



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

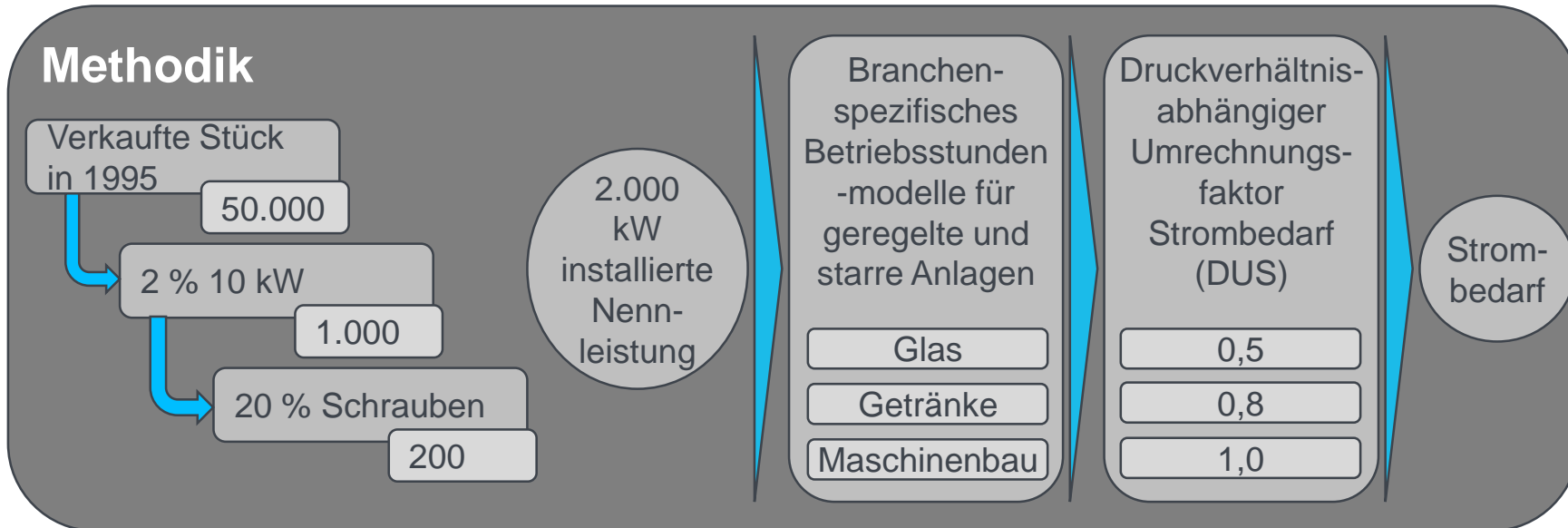
Bisherige Angaben zu Stromverbräuchen der Druckluft schwer nachvollziehbar

- 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

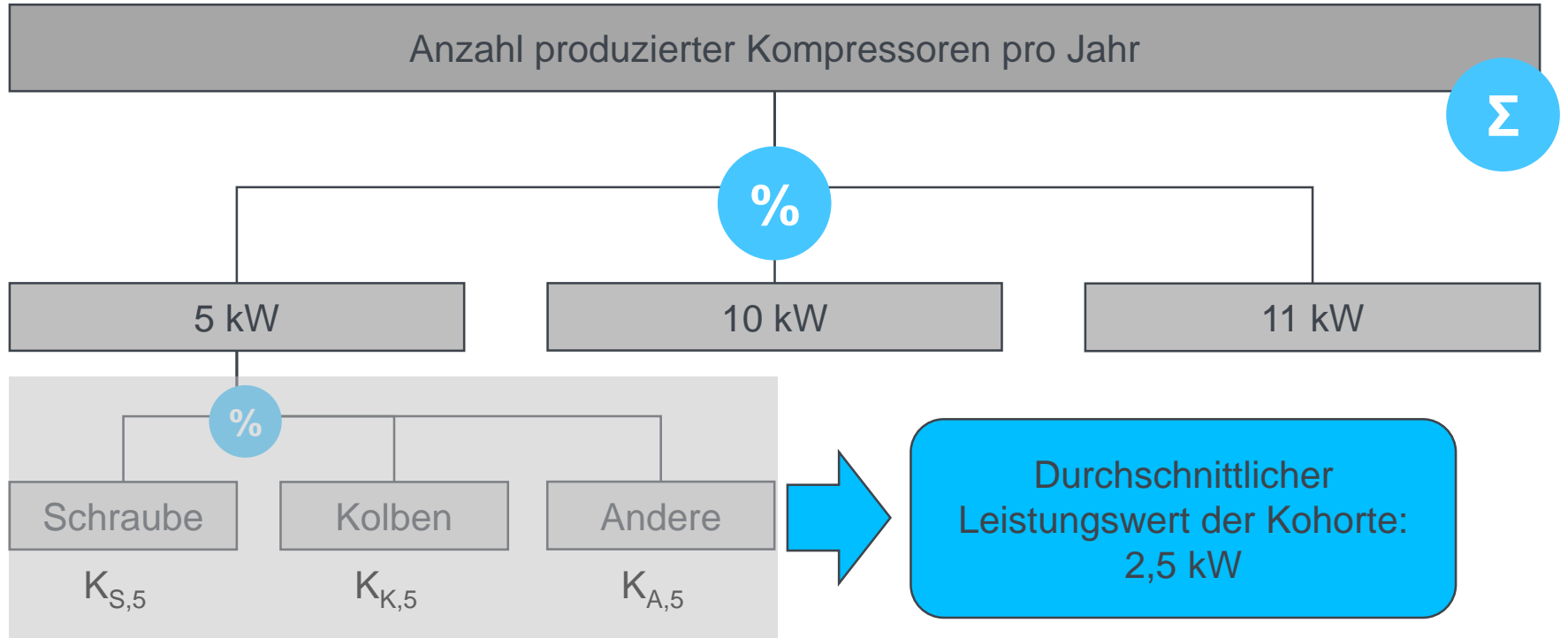
Berechnungsmethodik unterteilt die Kompressoren in Kohorten

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



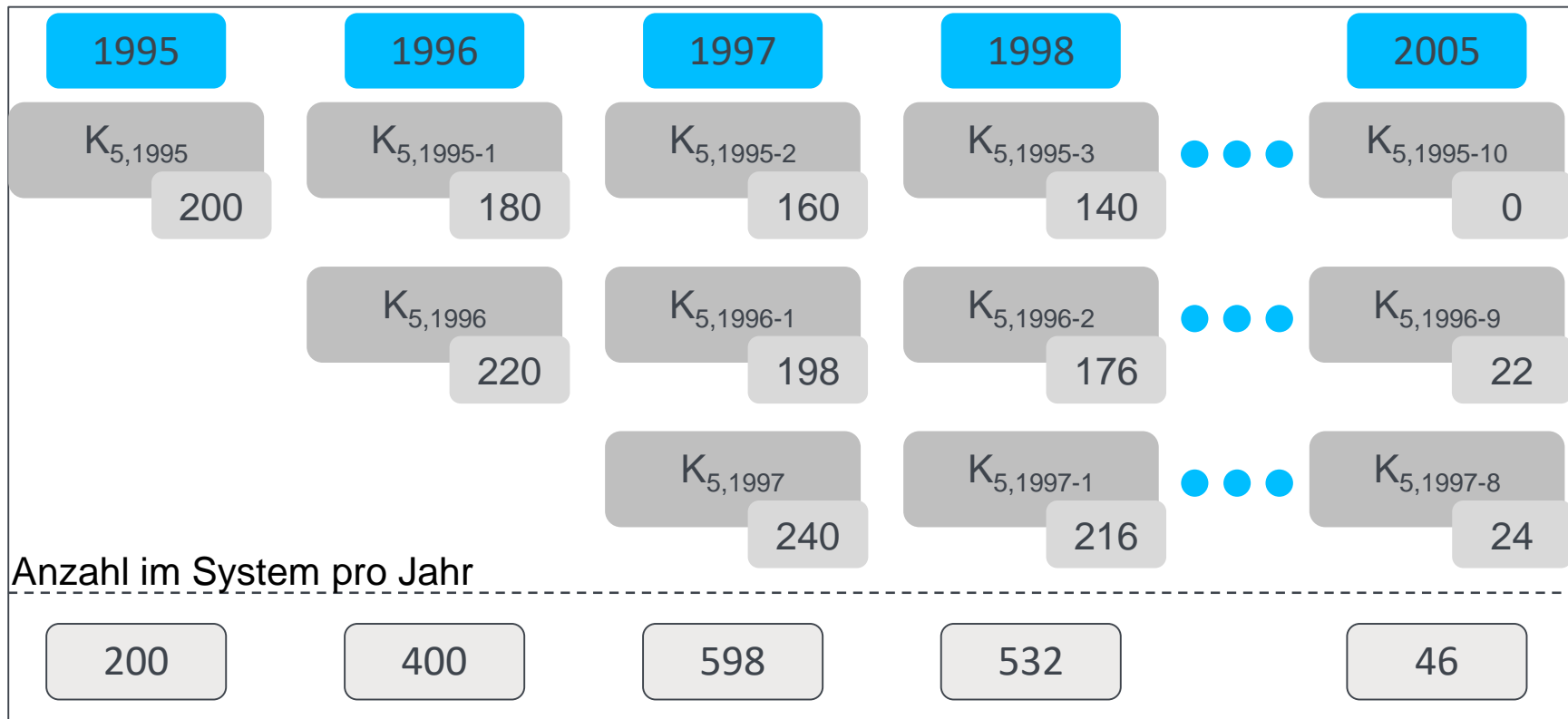
Methodik – Kohortenbildung

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

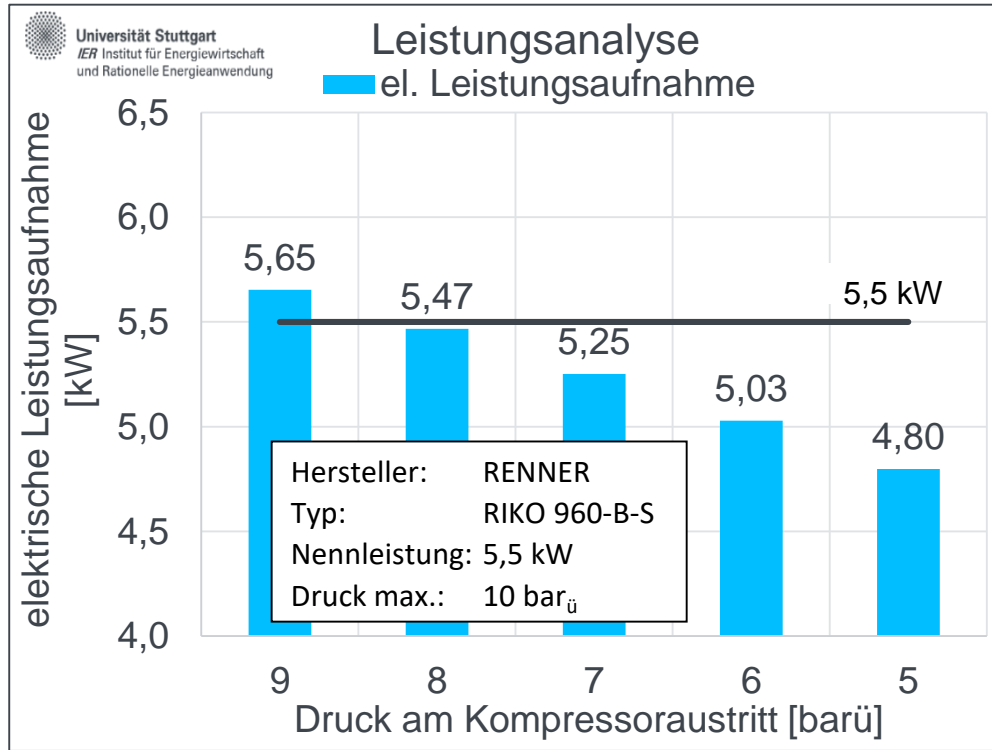
- Drehzahlstarr mit 3 Betriebspunkten
- Drehzahlvariabel mit quasi beliebig vielen Laststufen
- Jede Laststufe mit druck- und lastabhängigen Leistungsfaktoren

| 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



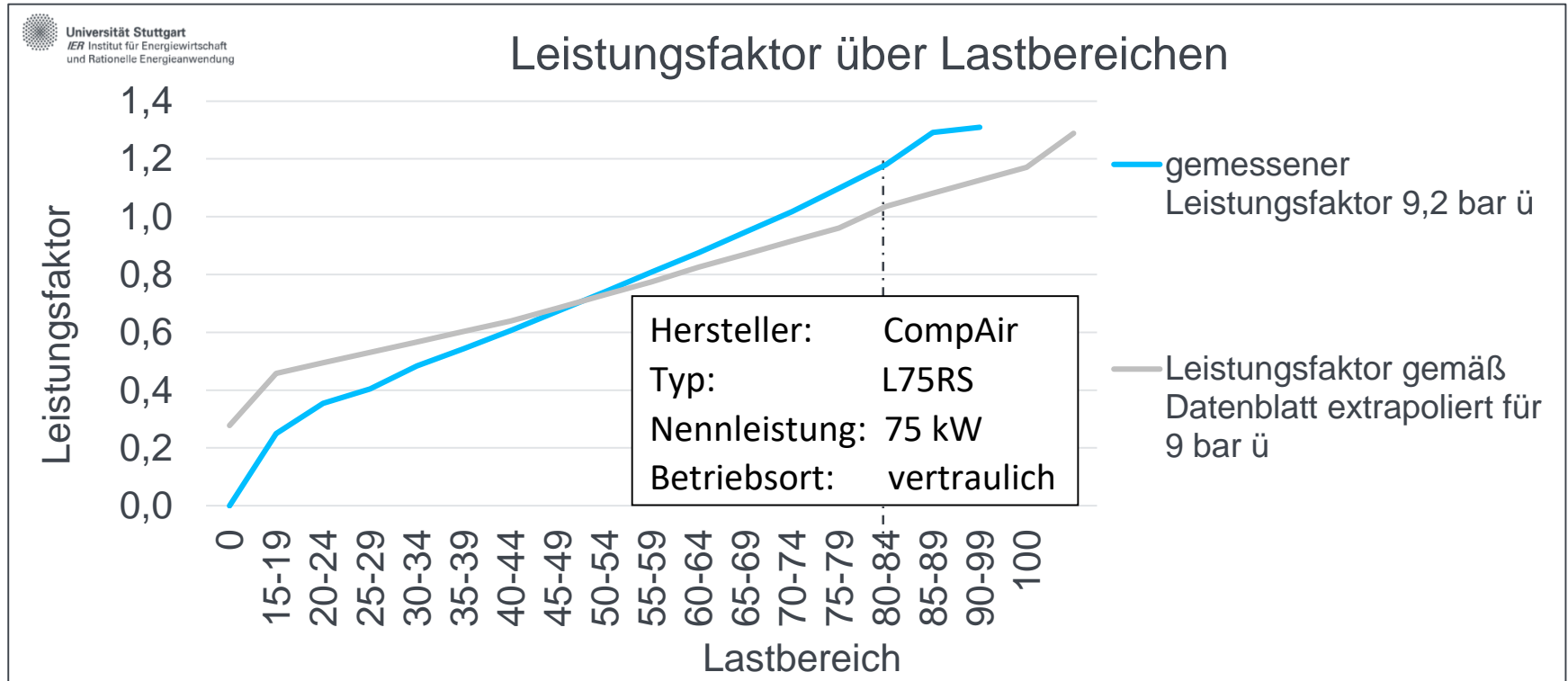
Quelle: eigene Messung

| Mittelwert Druck [bar _ü] | 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 ≤ 15 bar, giving a flow ≤ 60 m³/hour
- 28132650: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity ≤ 15 bar, giving a flow per hour > 60 m³),
- 28132670: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity > 15 bar, giving a flow per hour ≤ 120 m³
- 28132690: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity > 15 bar, giving a flow per hour > 120 m³
- 28132730: Rotary displacement compressors, single-shaft
- 28132753: Multi-shaft screw compressors

Methodik – Produktionsstatistiken

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

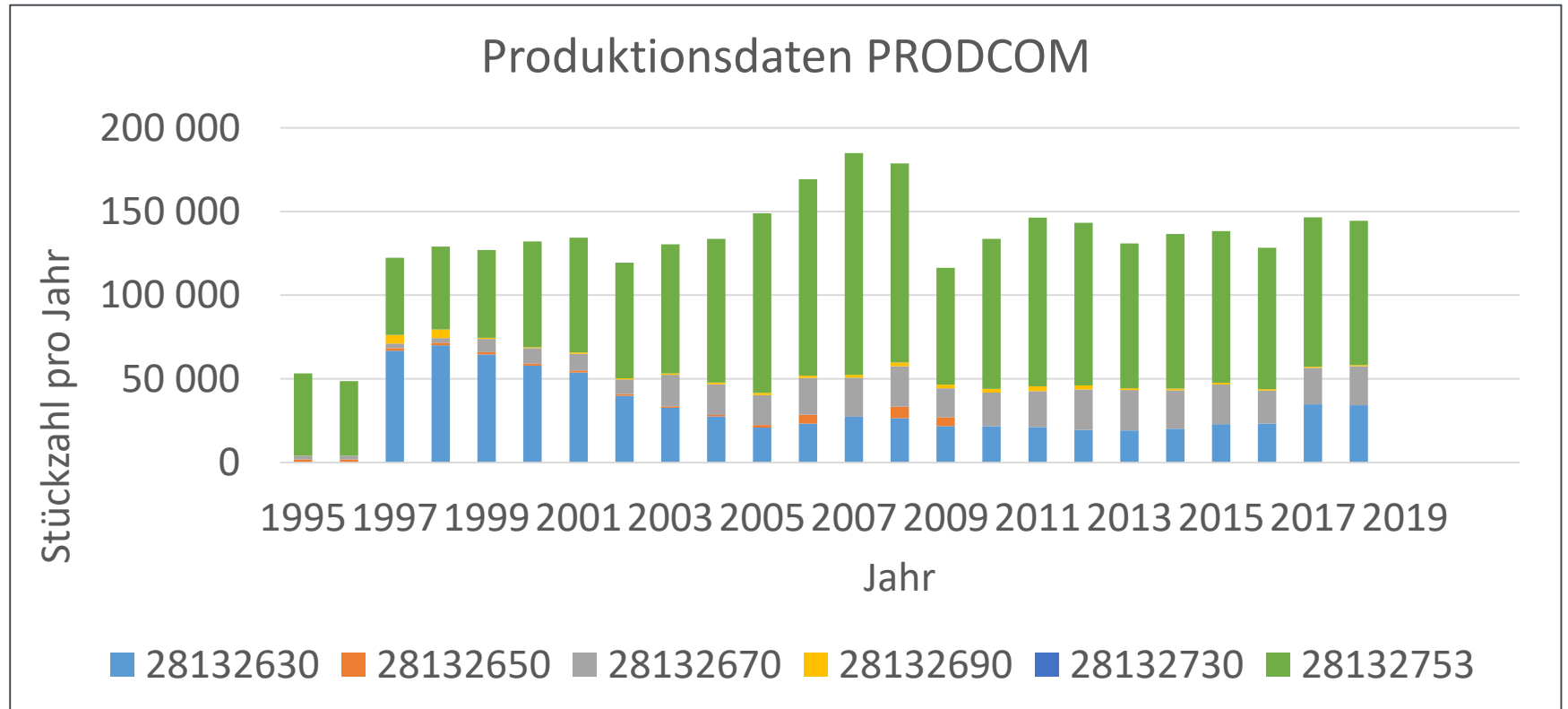
| ProdQNT | 28132630 | 28132650 | 28132670 | 28132690 | 28132730 | 28132753 | Summe |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 1995 | 0 | 1.916 | 2.177 | 0 | 0 | 49.092 | 53.185 |
| 1996 | 0 | 1.833 | 2.247 | 0 | 0 | 44.487 | 48.567 |
| 1997 | 66.815 |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



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

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 % | 14.339 |
| 1996 | 48.567 | 26,96 % | 13.094 |
| 1997 | 122.391 | 26,96 % | 32.997 |
| 1998 | 129.021 | 26,96 % | 34.784 |
| 1999 | 127.033 | 26,96 % | 34.248 |

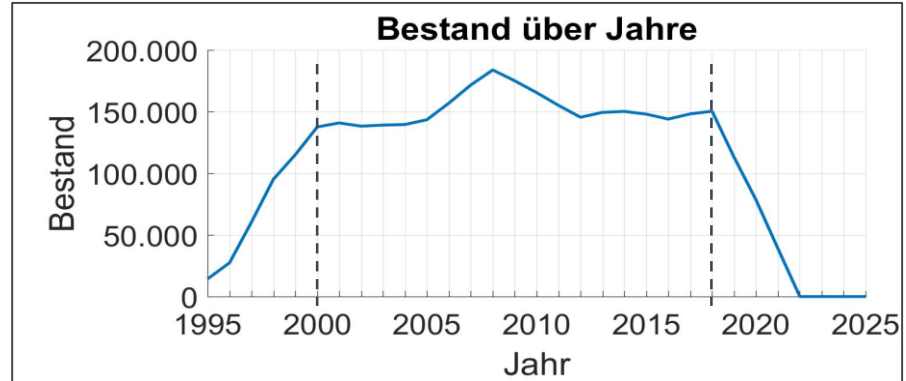


| ProdQNT | Summe | Kohortenanteil 5 kW | Kohorte |
|---------|---------|---------------------|---------------|
| 2014 | 136.563 | 26,96 % | 36.817 |
| 2015 | 138.192 | 26,96 % | 37.257 |
| 2016 | 128.375 | 26,96 % | 34.610 |
| 2017 | 146.577 | 26,96 % | 39.517 |
| 2018 | 144.511 | 26,96 % | 38.960 |

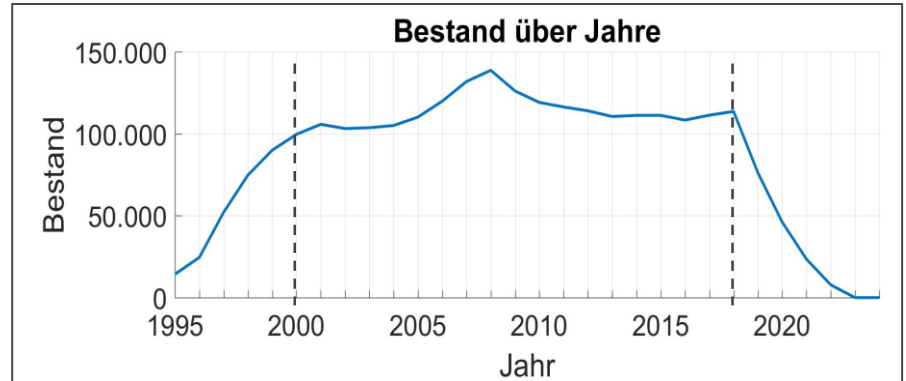
Beispielrechnung – Bestandsfunktion mit variablen Austrittsfunktionen

Lebensdauer hat erheblichen Einfluss auf den Strombedarf

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



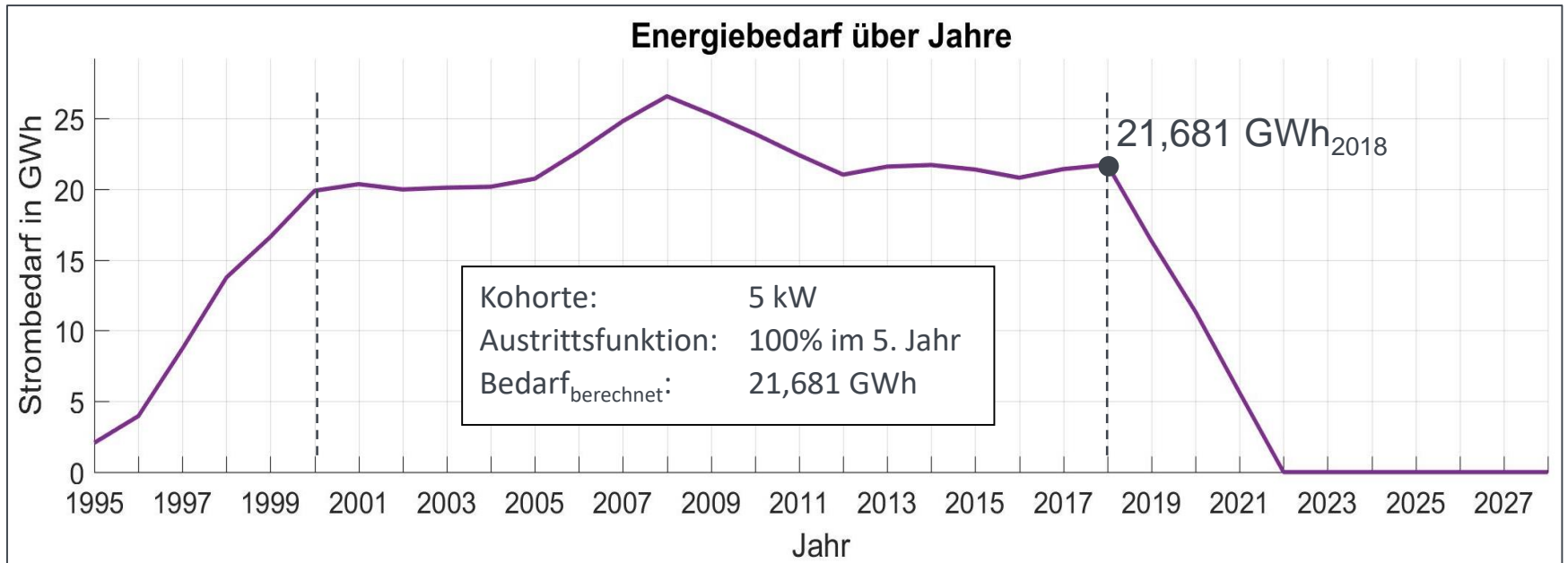
- 20 % vom jeweiligen Anfangsjahr fallen pro Jahr aus
- Circa 76.000 Kompressoren



Beispielrechnung – Stromverbrauch

Der Stromverbrauch ist über die Jahre aufgezeigt darstellbar

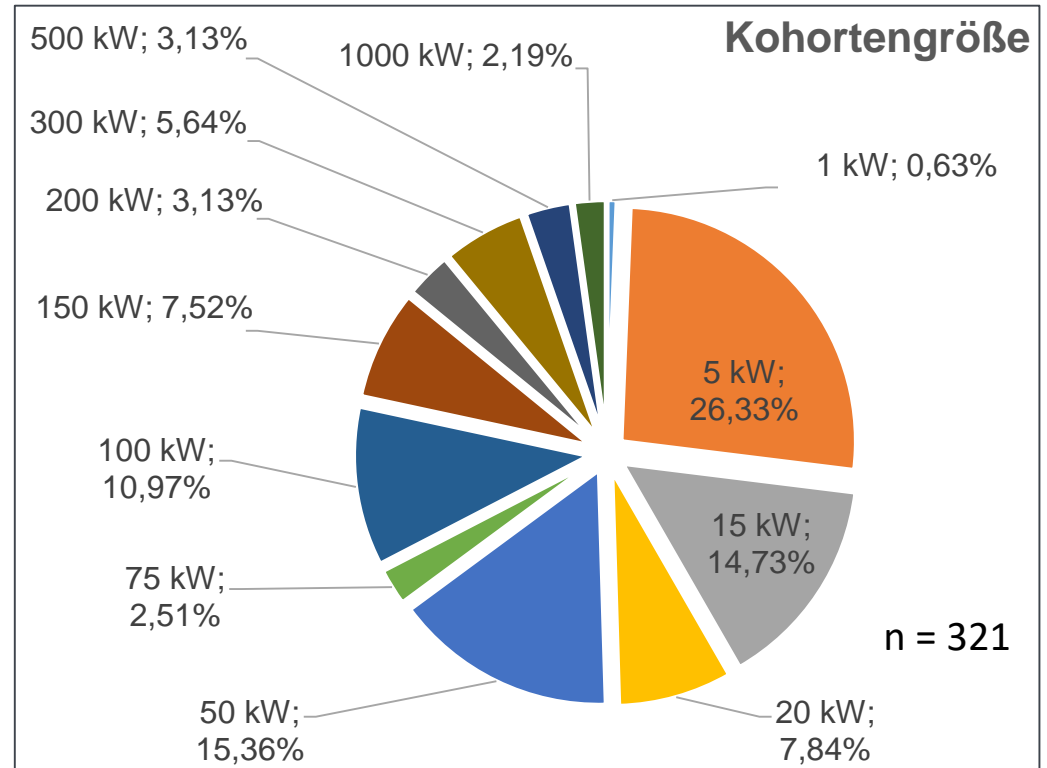
- Abfall der Bedarfskurve durch Austrittsfunktion bedingt – keine Prognose
- Szenarienanalysen für die Zukunft grundsätzlich vorstellbar



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

Telefon +49 (0) 711 685-87885

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
- 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).