

# Umweltverträgliche organische Arbeitsmedien

## Experimenteller Vergleich von R1233zd-E als Ersatz für R245fa

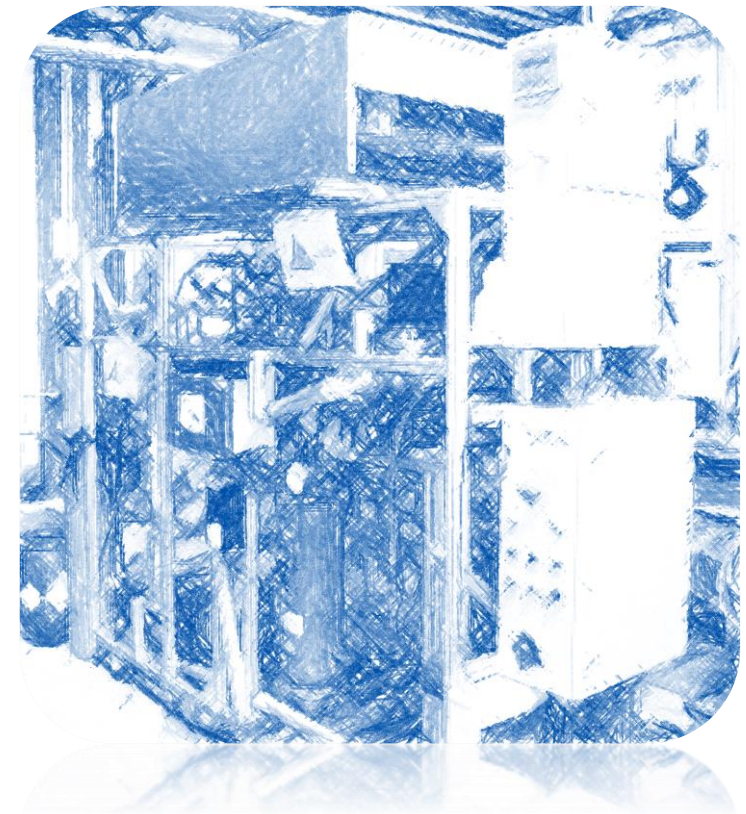
Sebastian Eyerer

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

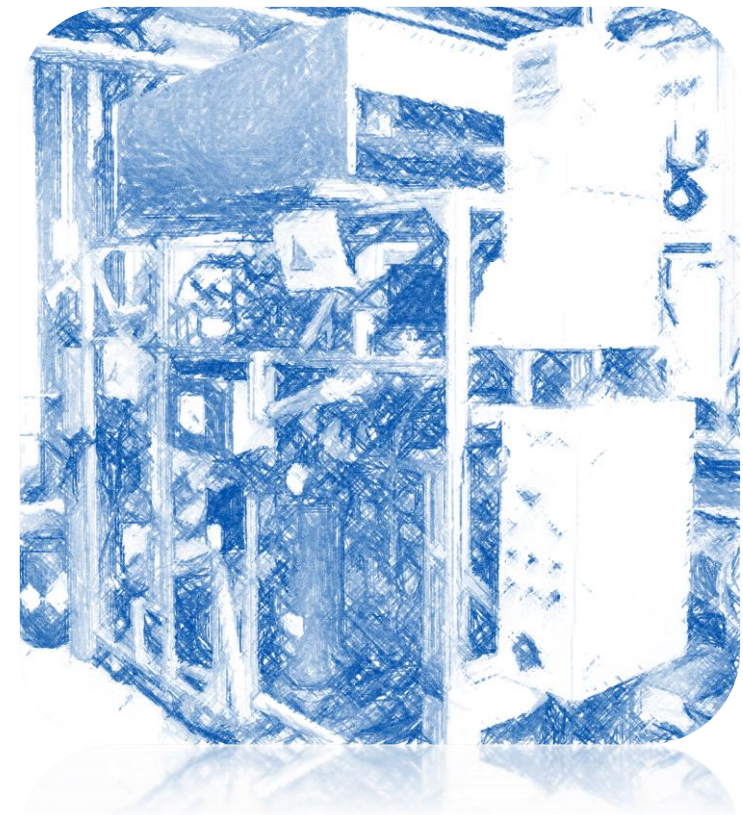
Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 05. Oktober 2016



# Agenda

- 1) Motivation und Stand der Technik
- 2) Experimentelles Vorgehen und ORC Versuchsstand
- 3) Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung



# Motivation und Stand der Technik

Stand der Technik: Arbeitsmedien für geothermische Organic Rankine Cycle (ORC) Anlagen

Arbeitsmedium	Tetrafluorethan R134a	Pentafluorpropan R245fa	Isopentan R601a	Isobutan R600a
Global Warming Potential (GWP)	1300	1030	3	3
Sicherheitsgruppe	A1	B1	A3	A3

→ **Stand der Technik Fluide sind entweder klimaschädlich (hohes GWP) oder explosiv**

## Folgen:

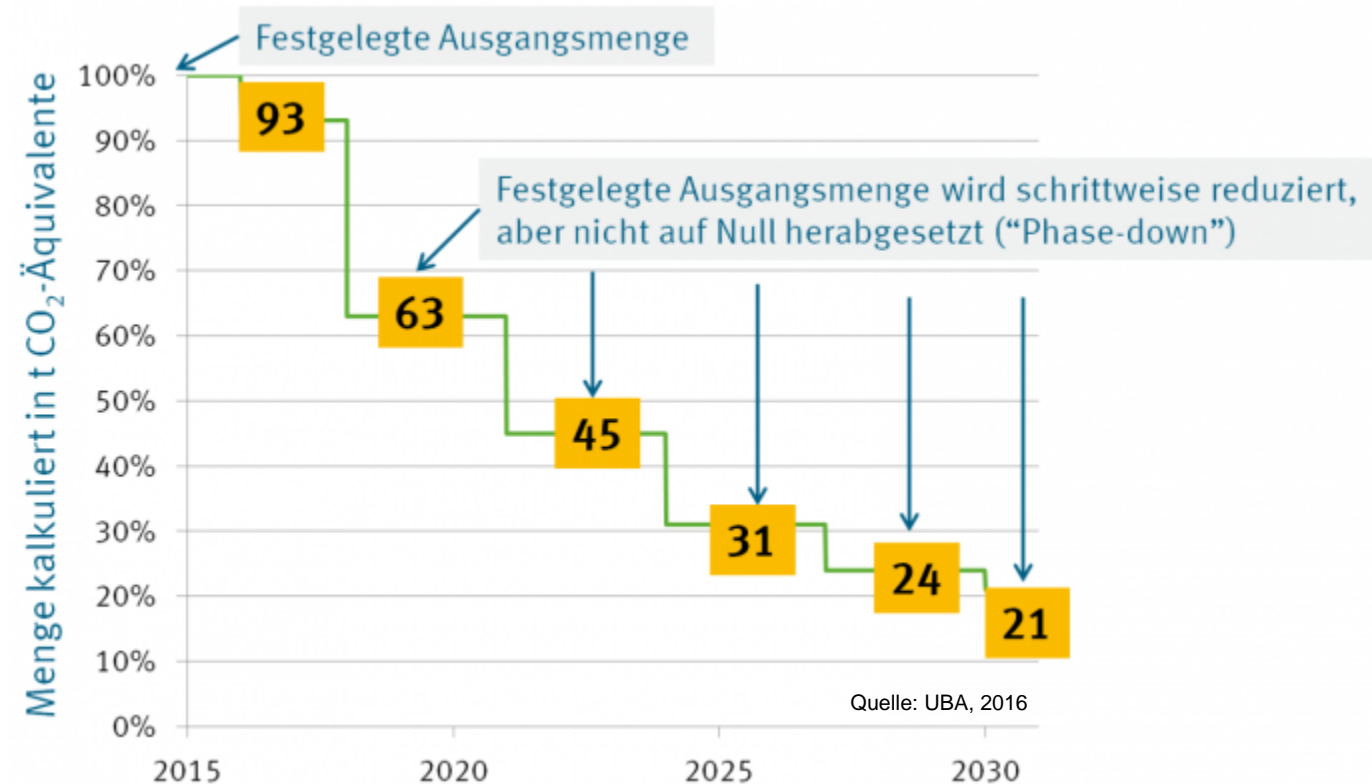
- Handhabung von explosiven Arbeitsmedien ist gut möglich, **allerdings mit höheren Investitions- und Betriebskosten verbunden**
- Politische Rahmenbedingungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen können zu höheren Kosten für Arbeitsmedien führen

# Motivation und Stand der Technik

## Gesetzliche Rahmenbedingungen für Arbeitsmedien

### F-Gas Verordnung (EU) Nr. 517/2014:

- definiert schrittweise Beschränkung der verfügbaren Menge (ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)
- Alle Nachfrager in der EU konkurrieren um eine Gesamtmenge.
  - steigende Preise für Arbeitsmedien mit hohem GWP sind zu erwarten
- Keine Inverkehrbringungs- oder Verwendungsverbote für ORC
- Kürzere Intervalle der Dichtheitsprüfung bei Anlagen mit hohem CO<sub>2</sub>-Äquivalenten
  - höhere Betriebskosten für Arbeitsmedien mit hohem GWP



# Motivation und Stand der Technik

Mögliche Alternativen zum Stand der Technik: neue Generation an Arbeitsmedien – Hydrofluroolefine

Arbeitsmedium	R1234yf	R1234ze	R1233zd-E	R1336mzz-Z
Global Warming Potential (GWP)	4	7	7	2
Sicherheitsgruppe	A2	A2	A1	A1

→ Alternative Arbeitsmedien mit geringem GWP und keiner/geringer Brennbarkeit sind mittlerweile verfügbar

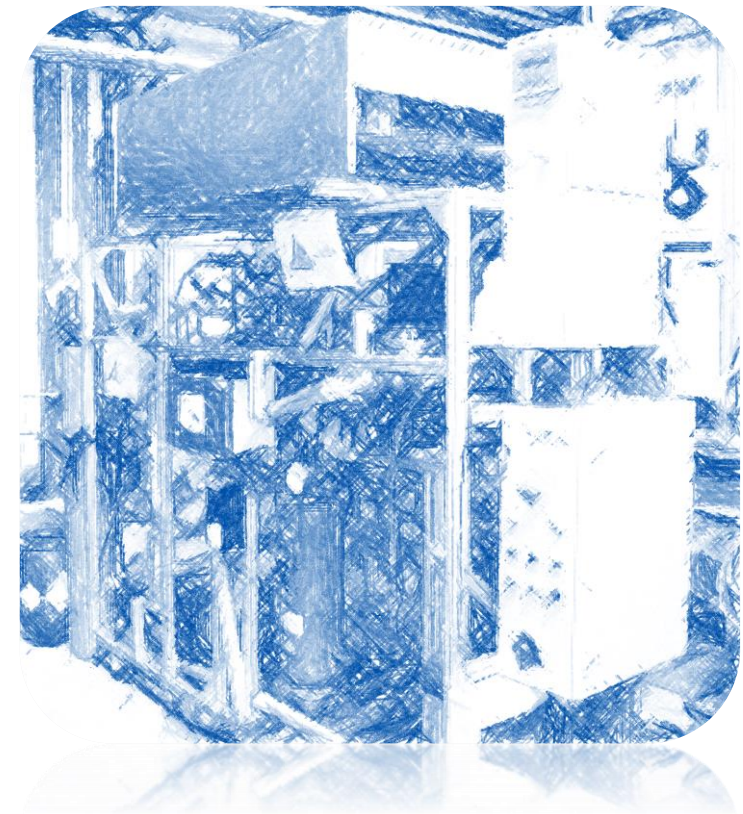
Neue Arbeitsmedien haben positiven Einfluss auf Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit

## Aber:

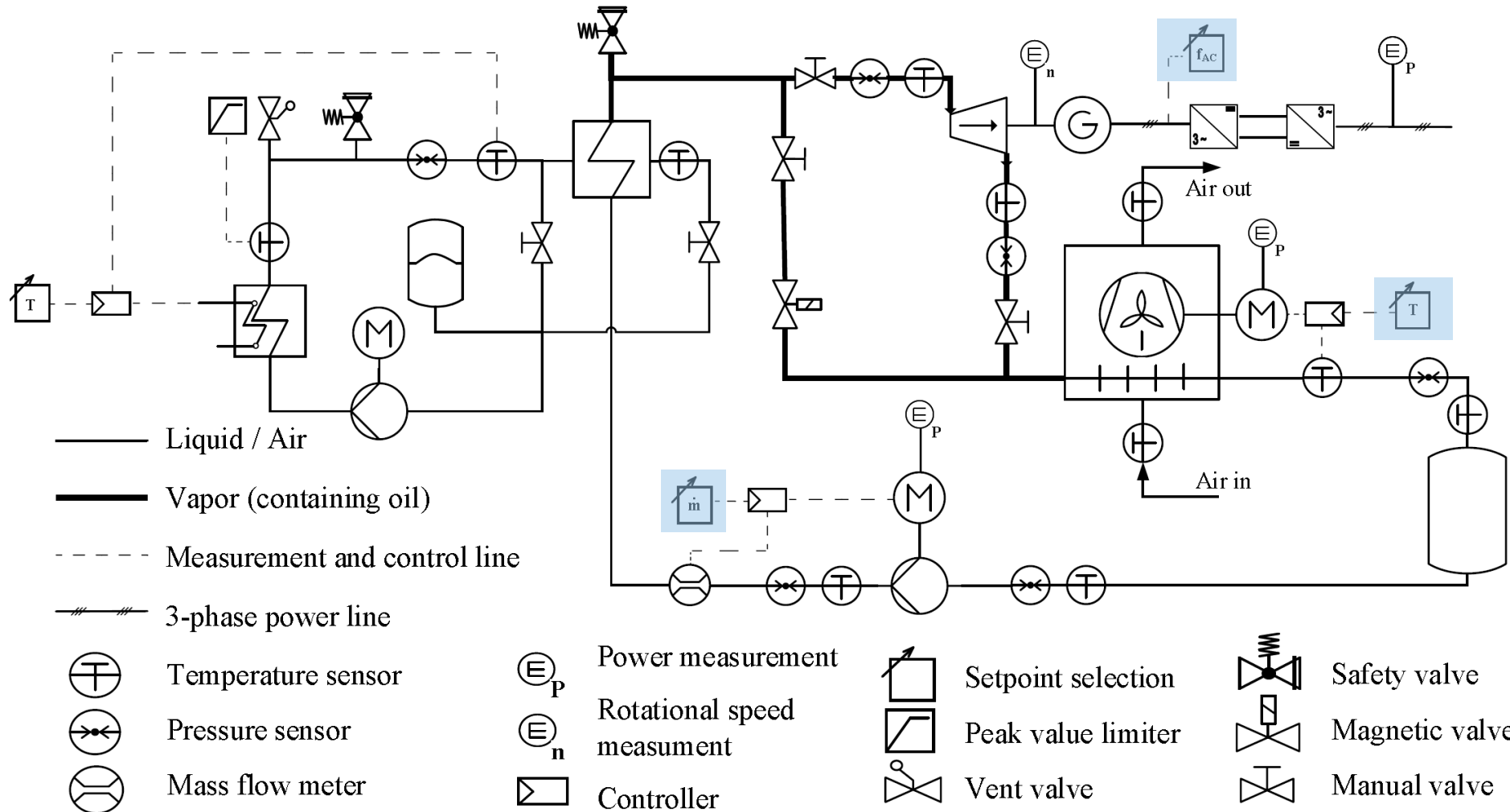
- Fehlende Praktische Erfahrung zum Einsatz der neuen Kältemittel
- Einsetzbarkeit in bestehenden Anlagen bisher unsicher bzw. nicht im Detail untersucht

# Agenda

- 1) Motivation und Stand der Technik
- 2) Experimentelles Vorgehen und ORC Versuchsstand**
- 3) Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung



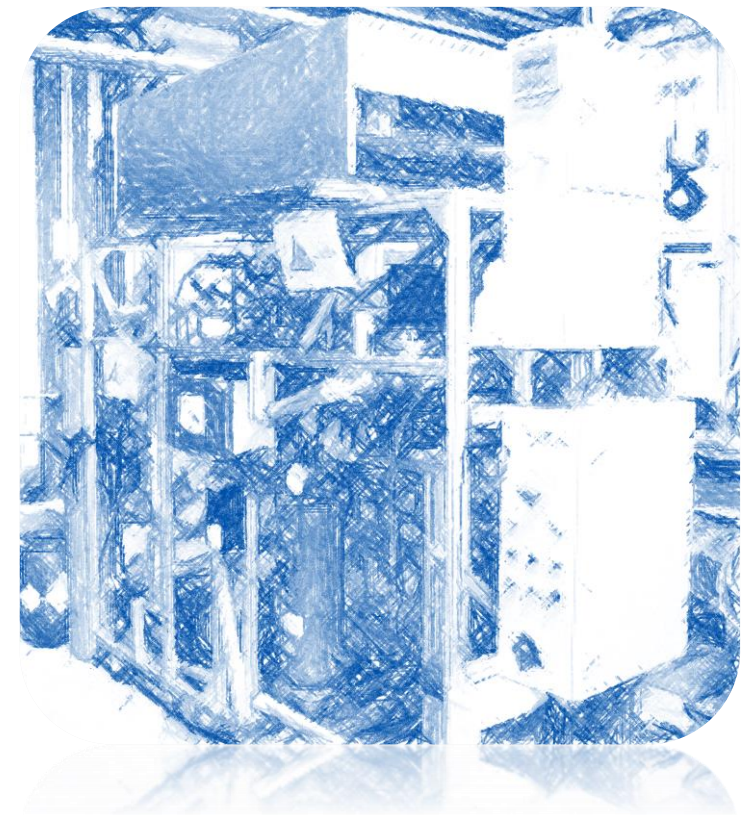
# Experimentelles Vorgehen und ORC Versuchsstand



Quelle: Eyerer, 2016b

# Agenda

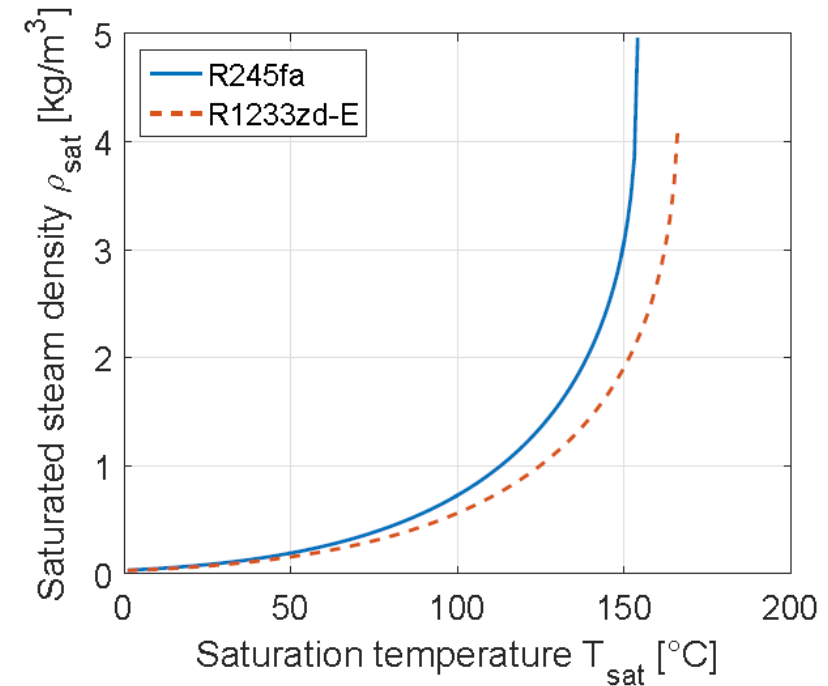
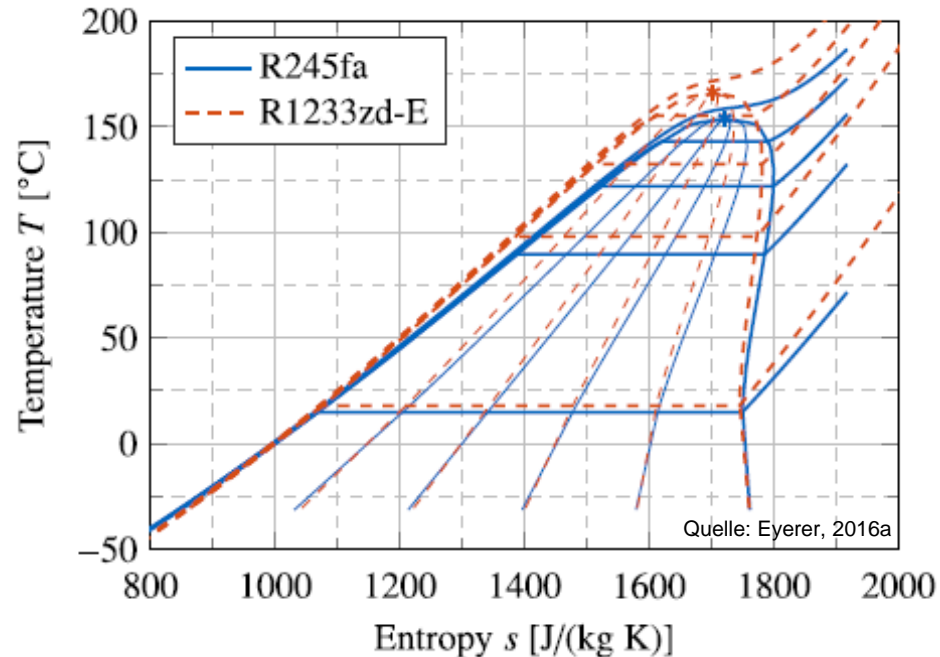
- 1) Motivation und Stand der Technik
- 2) Experimentelles Vorgehen und ORC Versuchsstand
- 3) Ergebnisse**
- 4) Zusammenfassung





# Ergebnisse

## Thermophysikalischer Vergleich von R245fa und R1233zd-E

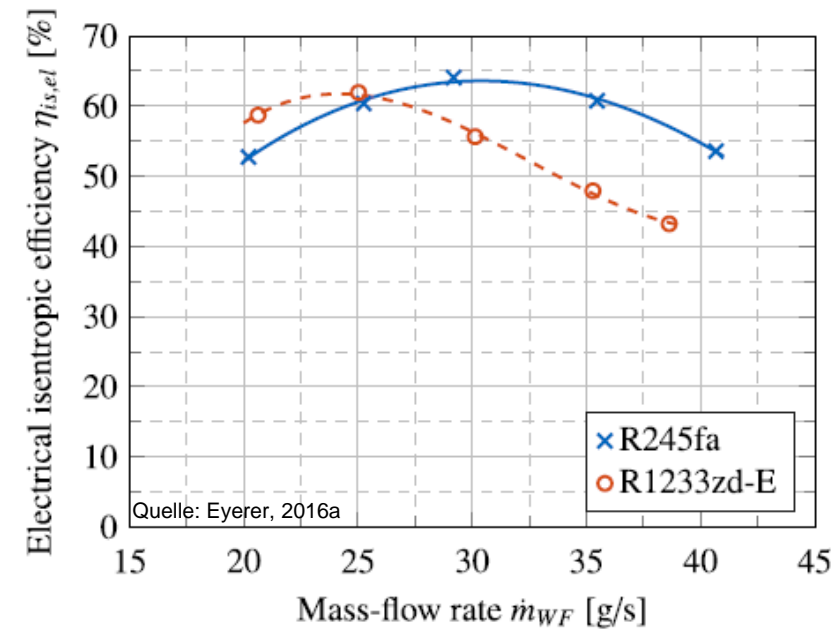
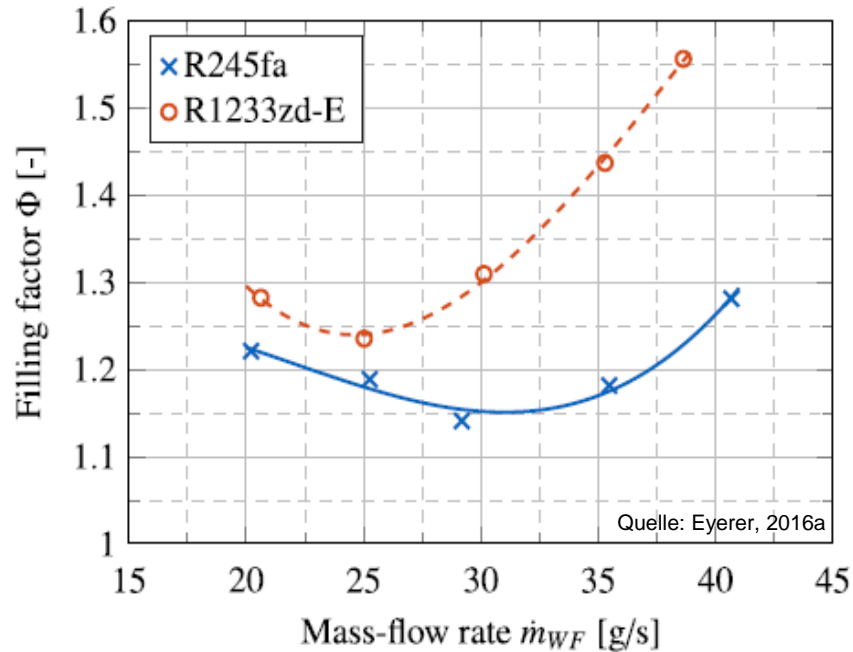


Ähnliche thermophysikalischen Stoffdaten in Bezug auf T-s Diagramm

Sattdampfdichte unterscheidet sich besonders bei hohen Temperaturen  
 → bei gleichem Massenstrom hat R1233zd-E einen höherer Volumenstrom

# Ergebnisse

## Komponentenspezifische Betrachtung des Scroll-Expanders



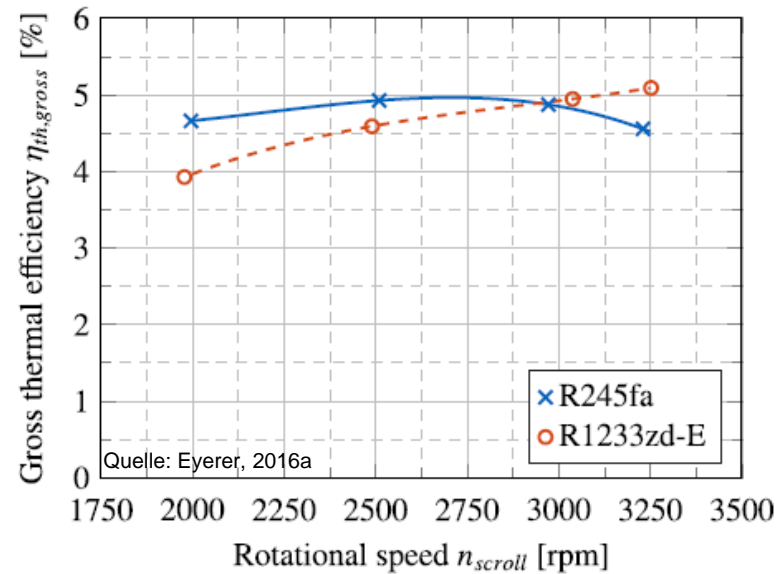
Füllfaktor bei volumetrischen Maschinen: Verhältnis aus tatsächlichem und theoretischem Volumenstrom

→ je größer der Füllfaktor, desto größer ist die interne Leckage (Massenstrom der durch Maschine geht aber keine Arbeit leistet)

Höhere Volumenströme von R1233zd-E führen in Bestandsanlagen zu höheren inneren Leckagen und damit geringerem isentropen Wirkungsgrad (Ergebnis grundsätzlich auch auf Turbinen übertragbar)

# Ergebnisse

## Komponentenspezifische Betrachtung des Scroll-Expanders



### Mögliche Maßnahme für Bestandsanlage:

**Erhöhung der Expander-Drehzahl** (Ergebnis grundsätzlich auch auf Turbinen übertragbar)

Allerdings nur in gewissen Grenzen möglich bzw. mit Kosten für Umbaumaßnahmen verbunden

### Umsetzung in neuer Anlage:

**Vergrößerung der Strömungsquerschnitte in der Maschine** (Ergebnis grundsätzlich auch auf Turbinen übertragbar)

# Ergebnisse

## Komponentenspezifische Betrachtung der Wärmetauscher

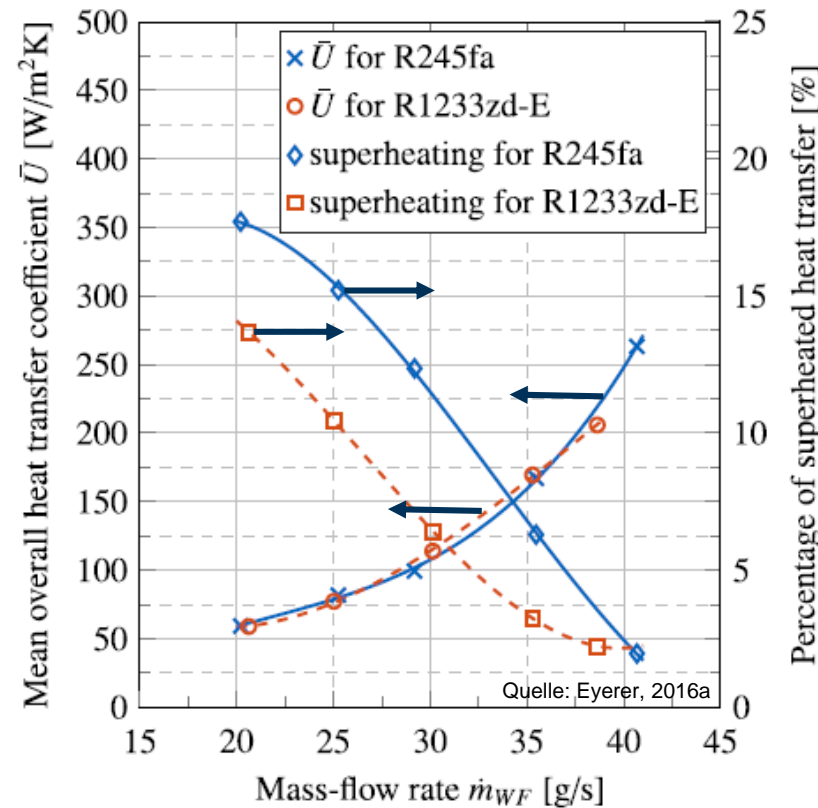
Wärmeübergang im Verdampfer  
sehr ähnlich für beide Fluide

**Grund:** Dichte der Flüssigkeiten,  
th. Leitfähigkeit, Viskosität, Wärme-  
kapazität beider Medien sind sehr ähnlich

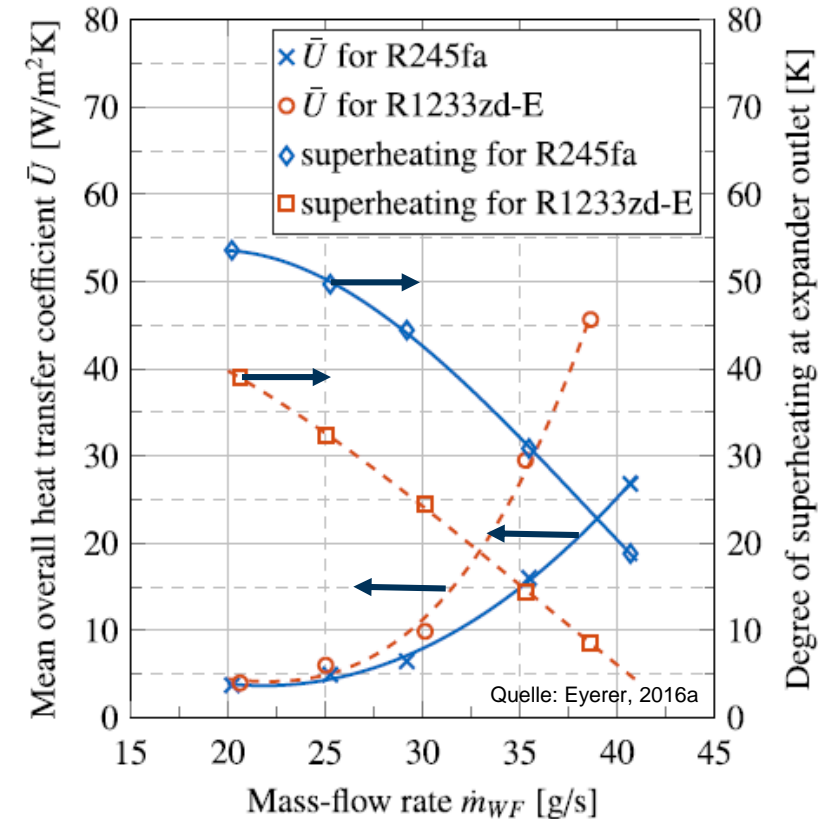
Signifikant höherer Wärmeübergang  
im Kondensator für R1233zd-E

**Hauptgrund:** Geringere Dampfdichte  
und höhere Strömungsgeschwindigkeit  
bei R1233zd-E

Druckverlust steigt ebenfalls an



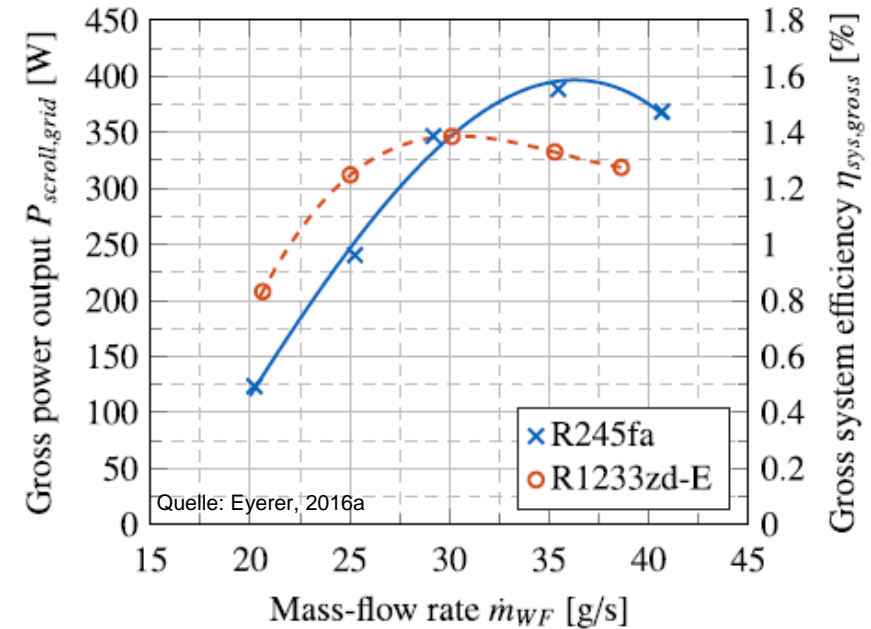
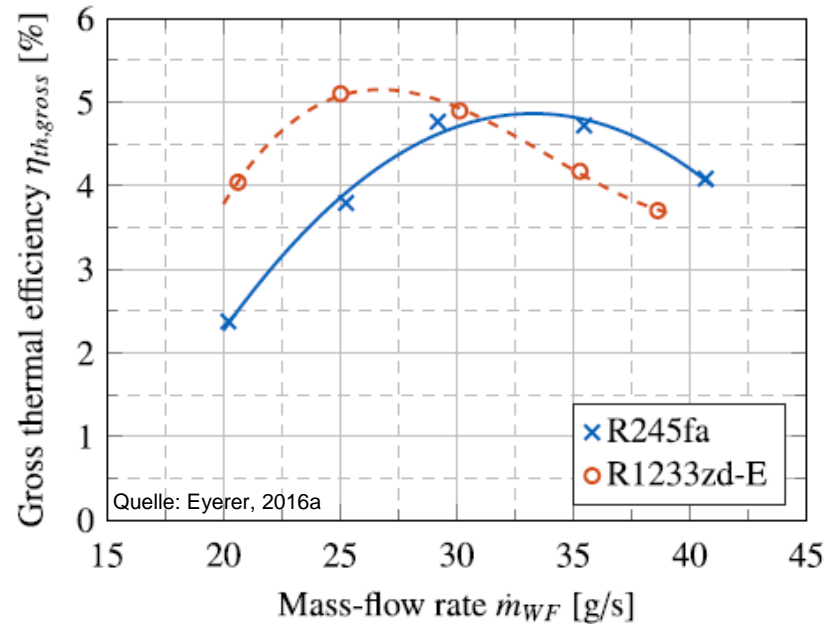
Verdampfer



Kondensator

# Ergebnisse

## Betrachtung der Gesamtanlage



Thermischer Wirkungsgrad um ca. 7% höher bei der Verwendung von R1233zd-E

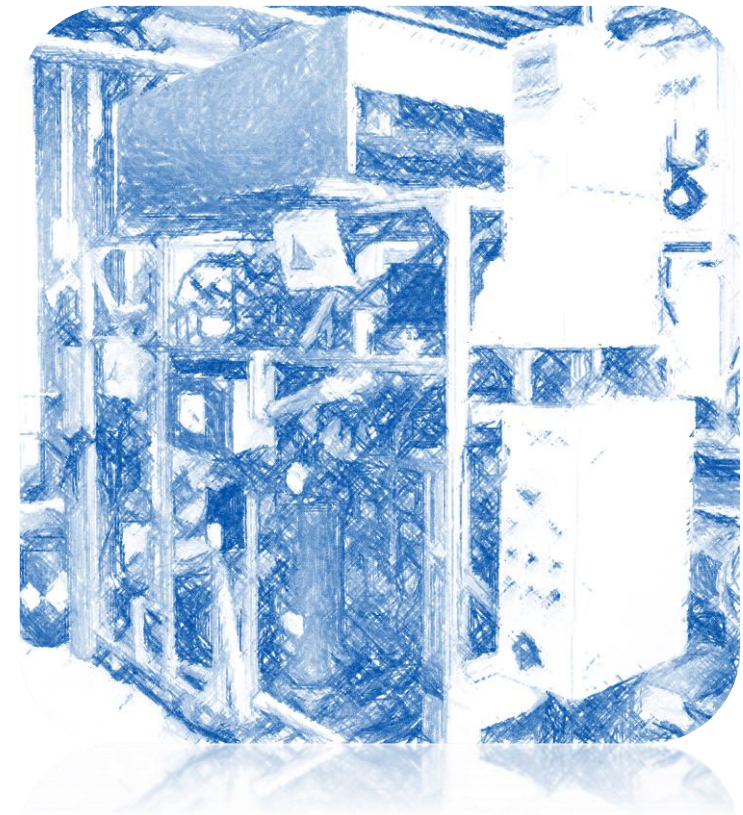
**Grund:** geringere Auskühlung der Wärmequelle wegen höherem Verdampfungsdruck

Elektrische Bruttoleistung sinkt um ca. 12% bei der Verwendung von R1233zd-E

**Grund:** verschlechterter isentroper Wirkungsgrad der Expansionsmaschine

# Agenda

- 1) Motivation und Stand der Technik
- 2) Experimentelles Vorgehen und ORC Versuchsstand
- 3) Ergebnisse
- 4) **Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

Stand der Technik Fluide sind entweder klimaschädlich (hohes GWP) oder explosiv

Alternative Arbeitsmedien mit geringem GWP und keiner/geringer Brennbarkeit sind mittlerweile Verfügbar und haben positiven Einfluss auf Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit

R1233zd-E kann in ORCs als Ersatz für R245fa verwendet werden

Höhere Volumenströme von R1233zd-E führen in Bestandsanlagen zu höheren inneren Leckagen und damit geringerem isentropen Wirkungsgrad

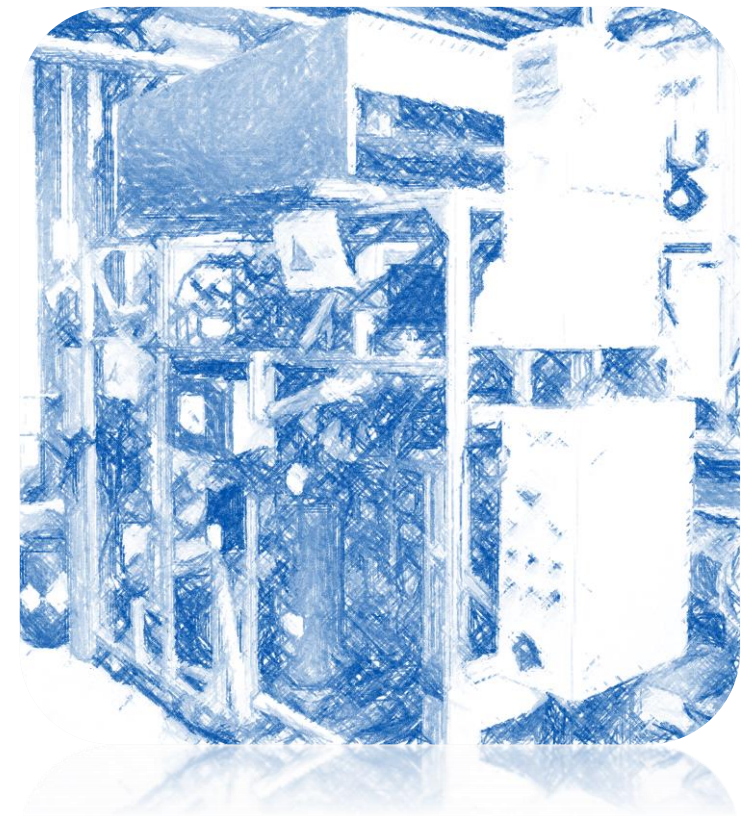
Thermischer Wirkungsgrad um ca. 7% höher bei der Verwendung von R1233zd-E

Elektrische Bruttoleistung sinkt um ca. 12% bei der Verwendung von R1233zd-E

→ Besonders interessant für neue Anlagen mit passender Expansionsmaschine da kein/geringerer Leistungsverlust aber höherer th. Wirkungsgrad

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

## Fragen und Diskussion





# Quellen

- (UBA, 2016) Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase>; aufgerufen am 31.08.2016
- ((EU) Nr. 517/2014) Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006
- (Eyerer, 2016a) Eyerer, Sebastian; Wieland, Christoph; Vandersickel, Annelies; Spliethoff, Hartmut: Experimental Study of an ORC (Organic Rankine Cycle) and Analysis of R1233zd-E as a Drop-In Replacement for R245fa for low Temperature Heat Utilization. Energy 103, 2016, 660-671
- (Eyerer, 2016b) Eyerer, S.; Liu, W.; Irl, M.; Ausfelder, S.; Dichtl, E.; Wieland, C.; Spliethoff, H.: Experimental Study of an ORC with Uncertainty Analysis and Inter-Model Comparison for Thermodynamic Properties of R1233zd-E. Proceedings of the Heat Powered Cycles Conference 2016, Nottingham, 27.06.2016

# Backup

# Kältemittel

## F-Gas Verordnung: Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluoridierte Treibhausgase

### Betreiberpflichten

- Vermeidung von Emissionen: Art. 3
  - Betreiber sind verpflichtet Leckagen unmittelbar zu beheben
  - Reparatur muss innerhalb eines Monats von einer „**zertifizierten natürlichen Person**“ überprüft werden.
- Dichtheitskontrollen: Art. 4
  - Anlagen mit 5 t CO<sub>2</sub>- Äquivalent oder mehr müssen auf Dichtheit kontrolliert werden
  - Diese Dichtheitskontrollen müssen bei ORCs **nicht** von einer „zertifizierten natürlichen Person“ durchgeführt werden
  - Wiederkehrende Dichtheitskontrollen:
    - Anlagen bis 50 t CO<sub>2</sub>- Äquivalent: 12 Monate ohne bzw. 24 Monate mit Leckage-Erkennungssystem
    - Anlagen bis 500 t CO<sub>2</sub>- Äquivalent: 6 Monate ohne bzw. 12 Monate mit Leckage-Erkennungssystem
    - Anlagen mit mehr als 500 t CO<sub>2</sub>- Äquivalent: 3 Monate ohne bzw. 6 Monate mit Leckage-Erkennungssystem

Kältemittel	GWP	5 t CO <sub>2</sub> -Äquivalent	50 t CO <sub>2</sub> -Äquivalent	500 t CO <sub>2</sub> -Äquivalent
R134a	1430	3,5 kg	35 kg	350 kg
R227ea	3220	1,5 kg	15 kg	150 kg
R245fa	1030	4,8 kg	48 kg	480 kg
R1234yf	4	1250 kg	12,5 t	125 t
R1234ze	7	714,3 kg	7,1 t	71,4 t
R1233zd	4,5	1111,1 kg	11,1 t	111,1 t

Fluorierte Treibhausgase nach (EU) Nr. 517/2014 die uns betreffen

Diese Medien sind von der F-Gas Verordnung nur im Rahmen der Berichterstattung bei der Herstellung betroffen  
 → **keine Betreiberpflichten**

Quelle: (EU) Nr. 517/2014