



# Klimaneutrale Energieversorgung für Industrie und Kommunen

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail  
FH Südwestfalen, Soest  
kail@fh-swf.de

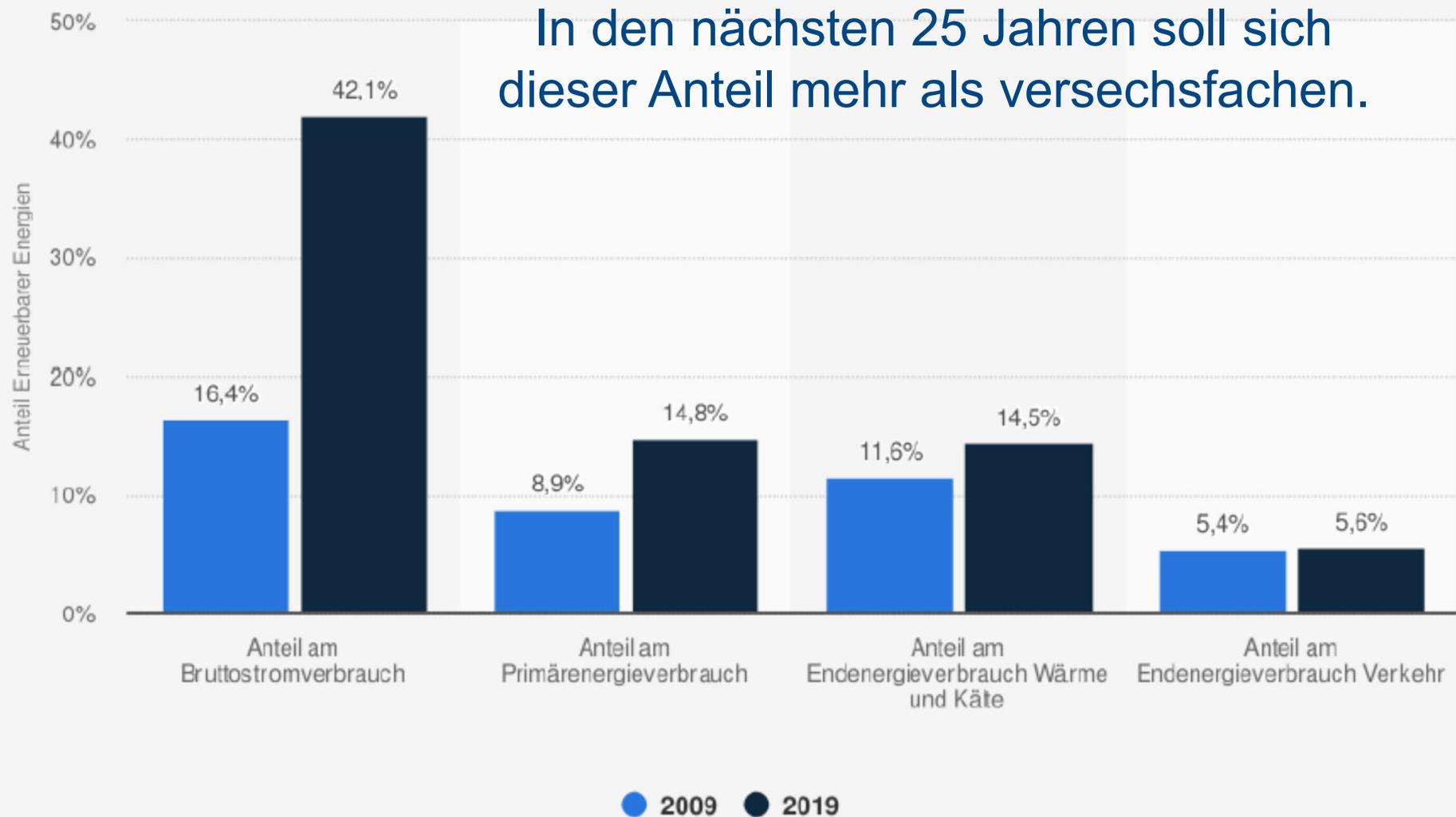
Workshop WFG Soest  
07.09.2021

# Bis 2045 soll die Energieversorgung Deutschlands klimaneutral sein

- Ziel: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95 % bis 2045
- Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien
- In Deutschland wird der Energiebedarf dann weitgehend durch Wind- und Solarenergie (Photovoltaik) gedeckt (Primärenergie).
- Elektrische Energie ist damit die neue Ausgangsenergie (Sekundärenergie) für sämtliche Anwendungen.
- Die Kapazitäten von Bioenergie und Wasserkraft werden in Deutschland bereits weitgehend genutzt und haben nur noch beschränkte Ausbaupotenziale.
- Die Nutzung von Erdwärme (Tiefengeothermie, 120 bis 150 ° C in 3 000 bis 4 000 m) ist in Deutschland bisher wirtschaftlich eher unattraktiv.

# Nach 20 Jahren Förderung decken die erneuerbaren Energien in Deutschland 15 % des Primärenergiebedarfes

In den nächsten 25 Jahren soll sich dieser Anteil mehr als versechsfachen.



# Elektrische Energie wird die neue Ausgangsenergie / Sekundärenergie

- Jede weitere Umwandlung der elektrischen Energie, z. B. in Wasserstoff, ist verlustbehaftet und erhöht die Kosten.
- Die Erzeugungskosten des erneuerbaren Stroms sind attraktiv und liegen in Deutschland im günstigsten Fall für Onshore-Windkraft bei 3 ct/kWh, für Photovoltaik bei 5 ct/kWh und für Offshore-Windkraft bei 5 ct/kWh.
- Beim Strompreis werden im Mittel keine drastischen Änderungen erwartet, da die sinkenden Kosten des EEGs ungefähr durch höhere Netzentgelte kompensiert werden.
- Die starke Fluktuation des Wind- und Solarstroms ist das Problem der Umstellung auf erneuerbare Energien und dürfte zu stark schwankenden Strompreisen führen. „Dunkelflauten“ von zwei Wochen sind immer wieder möglich.
- Das EEG wird zukünftig evtl. durch eine CO<sub>2</sub>-Abgabe ersetzt. Dadurch könnte der Strompreis entlastet werden.

# Stromerzeugung mit Windkraft in Südwestfalen

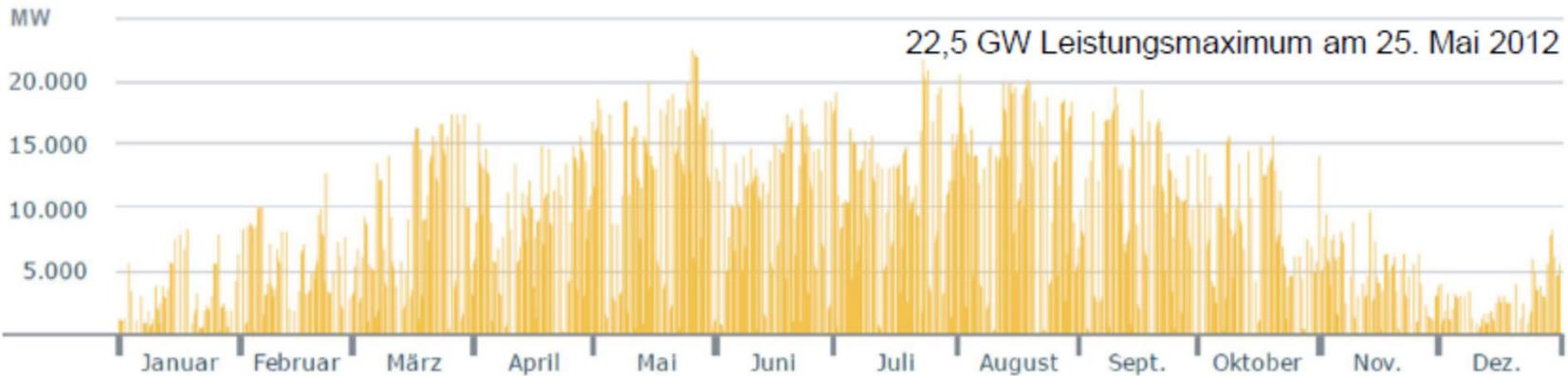
- z. B. Enercon Schwachwindanlage E-160 EP5 E2 mit 5,5 MW
- Nabenhöhe 140 / 166 m (je höher, desto besser die Verfügbarkeit), Rotordurchmesser 160 m
- Jährlicher Ertrag bei 166 m Nabenhöhe: rund 15 000 MWh, rund 2700 äquivalente VOLLlaststunden pro Jahr
- Gesamtinvestition: rund 5 Mio €
- Stromerzeugungskosten: rund 3 ct/kWh zzgl. 40 % EEG-Umlage (nicht für PtH und PtG) abzgl. Rückerstattung
- Fundament: Durchmesser 20 bis 30 m, Höhe 3 bis 4 m, ganz oder halb im Erdboden eingelassen
- Mindestabstand zur Wohnbebauung in NRW: 1000 m

# Stromerzeugung mit Photovoltaik in Südwestfalen

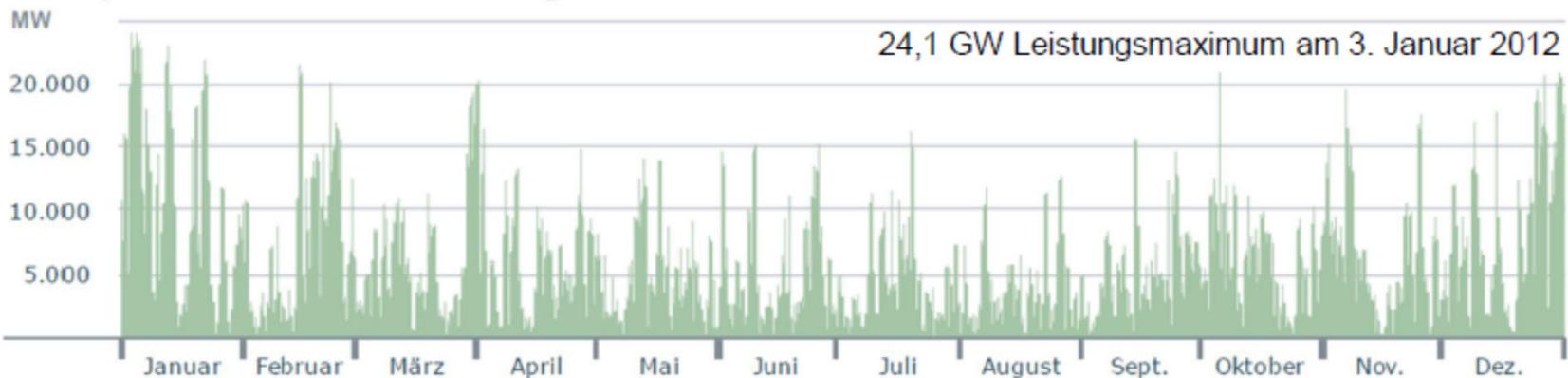
- Wind- und Sonnenstrom ergänzen sich gut (Wind vor allem im Winterhalbjahr, Sonne vor allem im Sommerhalbjahr)
- Installation auf den Dächern eines Industriebetriebs
- Beispiel: 2 MW, Investition rund 1,5 Mio €, Fläche rund 10 000 m<sup>2</sup>
- Jährlicher Ertrag: rund 1 600 MWh, rund 800 äquivalente Volllaststunden pro Jahr
- Stromerzeugungskosten: rund 5 ct/kWh zzgl. 40 % EEG-Umlage (nicht für PtH und PtG) abzgl. Rückerstattung

# Fluktuierende Stromproduktion mit Sonne und Wind in Deutschland im Jahr 2012

## Stromproduktion mit Photovoltaikanlagen



## Stromproduktion mit Windkraftanlagen



Quelle: Siemens AG, 2013

# Grüner Wasserstoff H<sub>2</sub> aus Power-to-Gas als Energiespeicher und Energie für Sonderanwendungen

- Erneuerbare elektrische Energie kann durch Elektrolyse in grünen Wasserstoff umgewandelt und gespeichert werden (PtG).
- Bei der Elektrolyse geht rund ein Drittel der elektrischen Energie verloren.
- Der erzeugte Wasserstoff kostet das Zwei- bis Dreifache der eingesetzten elektrischen Energie.
- Erneuerbare Energie kann in Form von grünem Wasserstoff aus anderen Ländern importiert werden. Deutschland wird auf Energieimporte angewiesen sein.
- Anwendungen, die für elektrische Energie ungeeignet sind, wie z. B. Flugzeuge, Containerschiffe oder Stahlwerke, können mit Wasserstoff betrieben werden.
- Strom für Power-to-Gas soll von der EEG-Umlage befreit werden.

# Blauer und türkiser klimaneutraler Wasserstoff aus Erdgas sind günstiger als grüner Wasserstoff

- Wird Wasserstoff über Dampfreformierung aus Erdgas erzeugt ( $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$ ) und wird das anfallende Kohlendioxid gespeichert (CCS), dann spricht man von blauem Wasserstoff. Politisch wird eine  $\text{CO}_2$ -Speicherung in Deutschland zurzeit nicht gewollt.
- Bei der Pyrolyse von Erdgas ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2 \text{H}_2$ ) wird türkiser Wasserstoff erzeugt. Der Kohlenstoff fällt in fester Form an. Gut die Hälfte der Energie des Erdgases wird dabei nicht genutzt.
- Blauer und türkiser Wasserstoff kosten zwei- bis dreimal so viel wie Erdgas und sind günstiger als grüner Wasserstoff. Das Verfahren der Pyrolyse befindet sich noch in der Entwicklung.
- Zurzeit wird in der Politik noch diskutiert, ob blauer und türkiser Wasserstoff förderwürdig sind.

# Grünes, blaues und türkises Methan CH<sub>4</sub> als Erdgasersatz

- Aus Wasserstoff kann Methan erzeugt werden ( $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ ).
- Rund ein Fünftel der Energie des Wasserstoffs geht dabei verloren.
- Das Methan kostet rund das Doppelte des Wasserstoffs und dürfte damit im Allgemeinen teuer sein.
- Je nach Erzeugungsart des Wasserstoffs (grün, blau, türkis) erhält auch das Methan eine entsprechende Bezeichnung.

## Erneuerbare Wärme ist je nach Art der Erzeugung zwei- bis dreimal teurer als Wärme aus Erdgas

- Elektrische Energie kann in thermische Energie (Wärme) umgewandelt werden (Power-to-Heat).
- Im Niedertemperaturbereich kann mit Hilfe von Wärmepumpen rund das Dreifache der elektrischen Energie als Wärme gewonnen werden.
- Im Hochtemperaturbereich kann elektr. Energie oder Wasserstoff zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden.
- Bei Wasserstoff ist die Effizienz deutlich geringer und die Wärme ist rund dreimal teurer als bei Erdgas.
- Bei Einsatz von elektr. Energie ist die Wärme nur rund doppelt so teuer wie bei Erdgas.
- Strom für PtH soll von der EEG-Umlage befreit werden.

# Wärmerückgewinnung und Power-to-Heat mit Wärmespeicher können die Kosten senken

- Hohe Wärmekosten lassen Effizienzmaßnahmen, wie z. B. eine Wärmerückgewinnung, eher wirtschaftlich sein.
- Bei hoher Wind- und Solarstromproduktion kann günstiger Strom durch Power-to-Heat in Wärme umgewandelt und gespeichert werden.
- Im Niedertemperaturbereich (bis  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kommen Warmwasserspeicher zum Einsatz und im Hochtemperaturbereich Gesteinsspeicher (bis  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Projekt ETES, Hamburg, Bilfinger) oder Flüssigsalzspeicher (Spanien, Solarthermische Kraftwerke Andasol, Nitratsalz bis max.  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  einsetzbar).
- Ein Wärmespeicher wird sich nur dann rechnen, wenn häufig genug ausreichend niedrige Strompreise vorliegen.

# Niedertemperaturwärme aus Power-to-Heat mit Wärmepumpen

- Erzeugung der Niedertemperaturwärme mit Wärmepumpen (Leistungszahl 2 bis 4)
- Für Zeiten niedriger Strompreise bei hoher Wind- und Solarstromproduktion ist evtl. ein Warmwasserspeicher wirtschaftlich attraktiv.
- Die Speicherkosten sind stark vom Nutzungsprofil abhängig.
- Druckspeicher mit Wasser ermöglichen Temperaturen bis 115 ° C.
- Referenzprojekte z. B. bei Heizkraftwerken in Kiel, Nürnberg und Potsdam, 1 500 MWh, rund 10 Mio €, Speicherkosten rund 5 ct/kWh

# Hochtemperaturwärme (Dampferzeugung) aus Power-to-Heat und Wasserstoff

- Erzeugung der Hochtemperaturwärme (Dampferzeugung) mit elektr. Energie
- Für Zeiten hoher Strompreise bei „Dunkelflaute“ könnte der Einsatz von Wasserstoff zur Dampferzeugung wirtschaftlich von Vorteil sein.
- Für Zeiten niedriger Strompreise ist evtl. ein Hochtemperaturwärmespeicher und/oder ein Elektrolyseur mit Wasserstoffspeicher wirtschaftlich attraktiv. Der Strompreis müsste dafür ausreichend oft ausreichend niedrig sein.
- Wünschenswert wäre ein Dampferzeuger, der sowohl mit elektr. Energie als auch mit Wasserstoff betrieben werden könnte und der darüber hinaus bei Bedarf auch Wärme aus dem Speicher (Wärmeträger: Luft oder Thermoöl) nutzen kann.

## Die Speicherkosten von Strom in Akkus betragen je nach Einsatzprofil 10 bis 15 ct/kWh

- Trotz eines starken Preisverfalls bei Akkus sind die Speicherkosten, die stark vom Nutzungsprofil abhängen, immer noch hoch.
- Es ist zu erwarten, dass der Preisverfall anhalten wird und dass mittel- bis langfristig attraktive Speicherkosten erreicht werden können.
- Die Effizienz der Speicherung ist mit Verlusten von 10 bis 15 % gut.

# Demand-Side-Management zur Anpassung d. Verbrauches an die fluktuierende Wind- und Solarstromerzeugung

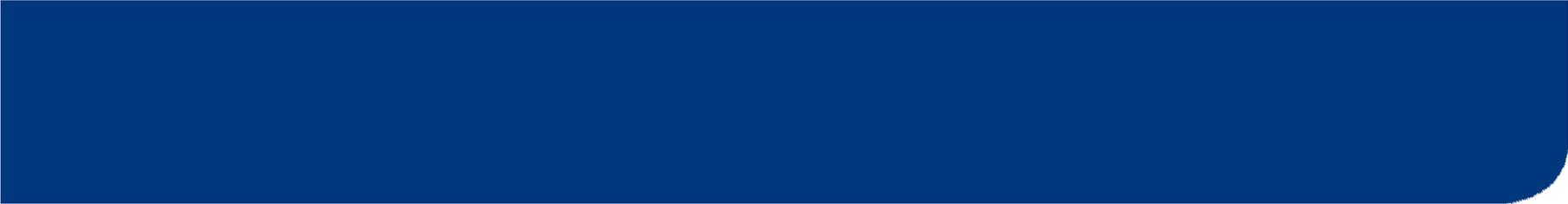
- Bei niedriger Wind- und Solarstromerzeugung und damit verbundenen hohen Strompreisen könnte sich, falls möglich, das Abschalten von Lasten rechnen. Zum Teil wird dies vergütet, z. B. in der Aluminiumproduktion.
- Bei hoher Wind- und Solarstromerzeugung und damit verbundenen niedrigen Strompreisen könnte sich eine Speicherung in Form von Wärme (Power-to-Heat), Wasserstoff (Power-to-Gas) oder zukünftig auch in Akkus rechnen.

## Fazit 1/2

- Eigenstromerzeugung mit Wind- und Solarenergie ist mittlerweile zu attraktiven Kosten möglich.
- Windkraft hat eine höhere Verfügbarkeit als Solarenergie.
- Elektrische Energie wird die neue Ausgangsenergie / Sekundärenergie für die gesamte Energieversorgung.
- Jede weitere Umwandlung der elektrischen Energie, z. B. in Wasserstoff, ist verlustbehaftet und erhöht die Kosten.
- Wasserstoff ist im Mittel deutlich teurer als elektr. Energie und kommt vor allem in den Zeiten zum Einsatz, wenn die Stromerzeugung zu niedrig ist und die Strompreise dadurch entsprechend hoch sind („Dunkelflaute“) oder wenn Prozesse nicht für elektr. Energie geeignet sind.

## Fazit 2/2

- Die fluktuierende Stromerzeugung von Wind- und Solarenergie wird zu stark schwankenden Strompreisen führen.
- Phasen niedriger Strompreise könnten zur Erzeugung und Speicherung von Wärme (PtH) oder Wasserstoff (PtG) genutzt werden. Mittel- bis langfristig könnte sich auch eine Speicherung von Strom in Akkus rechnen.
- Nur wenn es häufig Phasen mit niedrigen Strompreisen geben wird, kann die Speicherung von Wärme und die Erzeugung sowie Speicherung von Wasserstoff wirtschaftlich attraktiv sein.
- Aufgrund der stark steigenden Wärmekosten werden sich Effizienzmaßnahmen, wie z. B. eine Wärmerückgewinnung, eher rechnen als bisher.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Gerne stehe ich für Fragen zur Verfügung.

[kail@fh-swf.de](mailto:kail@fh-swf.de)