

CLIMATE CHANGE

19/2021

Potenzialstudie Energie- / Kosteneinsparung in der Fluidtechnik

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 19/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FKZ 37EV 18 103 0

FB000510

Potenzialstudie Energie-/Kosteneinsparung in der Fluidtechnik

Abschlussbericht

von

Tobias Radermacher, Marcel Merx, André Sitte, Vladimir Boyko
Institut für Mechatronischen Maschinenbau,
Technische Universität Dresden, Dresden


Manuel Unger
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung,
Universität Stuttgart, Stuttgart

im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Technische Universität Dresden
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing Jürgen Weber
Helmholtzstraße 7a
01069 Dresden

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Professur für Effiziente Energienutzung
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing Peter Radgen
Heßbrühlstraße 49a
70565 Stuttgart

Abschlussdatum:

Oktober 2020

Redaktion:

Fachgebiet V1.4 Energieeffizienz
Carsten Schindler, Reinhard Albert

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, April 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Potenzialstudie Energie-/Kosteneinsparung in der Fluidtechnik

Für lineare und rotatorische Bewegungen sind verschiedene Antriebstechnologien verfügbar, deren wirtschaftlicher Einsatz von Faktoren wie Investitions- und Betriebskosten abhängt. Vor dem Hintergrund der Herausforderungen des Klimawandels gewinnt die Energieeffizienz darüber hinaus aus ökologischer Perspektive an Bedeutung. Hydraulische und Pneumatische Aktoren, in der Gesamtheit als fluidtechnische Antriebe bezeichnet, sind weitverbreitet und setzen große Mengen Energie um. Anzahl und Nutzung hydraulischer und pneumatischer Antriebssysteme sowie ihr Energieumsatz in Deutschland sind bislang nicht bekannt.

Die Studie analysiert Verbreitung und Nutzung fluidtechnischer Antriebe und liefert eine Einschätzung des deutschlandweiten Energiebedarfs für die drei Bereiche Drucklufttechnik, Mobilhydraulik und Stationärhydraulik.

Mit der Entwicklung immer leistungsfähigerer mechanischer Aktoren stellt sich die Frage in welchen Applikationen und unter welchen Randbedingungen ein Ersatz von Hydraulik- und Pneumatikaktoren durch elektrisch-mechanische Aktoren technisch möglich und energetisch vorteilhaft sein könnte. Die Studie analysiert die Nutzung der Technologien nach Wirtschaftsbereichen aus Literatur- und Wirtschaftsdaten und nimmt eine Schätzung des Energiebedarfs für stationäre und mobile Hydraulikanwendungen sowie für die Drucklufttechnik und die pneumatische Antriebstechnik als Teilgebiet für den Bilanzraum Deutschland vor. Aufbauend darauf stellt die Technologiestudie Einsparpotentiale in den Bereichen Steuerungs- und Regelungstechnik, Technologieupdate und -substitution vor und analysiert darauf aufbauend energetisch wichtige Industrieanwendungen auf ihr Einsparpotential. Die Ergebnisse zeigen erhebliche Einsparpotentiale, für deren Umsetzung Maßnahmenvorschläge entwickelt werden.

Abstract: Report on Energy-Saving Potentials in Fluid Power Driven Applications

Various drive technologies are available for linear and rotary motion. Their economic use depends on factors such as investment and operating costs. Against the background of the climate catastrophe, energy efficiency is also gaining importance from an ecological perspective. Hydraulic and compressed-air driven actuators, collectively referred to as fluid power actuators, are widely used and convert large amounts of energy. The number and use of hydraulic and pneumatic drive systems and their energy requirement in Germany are not known.

The study analyzes the distribution and use of fluid-power drives and provides an estimate of Germany-wide energy requirements for the three areas: compressed-air technology as well as mobile and stationary hydraulics.

With the development of more and more powerful mechanical actuators, the question arises in which applications and under which boundary conditions a replacement of hydraulic and pneumatic actuators by electrical-mechanical actuators could be technically possible and energetically advantageous.

The study analyses the use of the technologies according to economic sectors, based on economic data from literature and estimates the energy demand for stationary and mobile hydraulic applications as well as for compressed air and pneumatic actuator technology as a sub-area for the balance area Germany. Based on this, a technology study presents potential savings in the areas of control technology, technology update and substitution and, based on this, analyses energetically significant industrial applications for their savings potential. The results show considerable savings potentials, for whose implementation measures are developed.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	15
Summary.....	23
1 Einleitung.....	30
1.1 Technologiebeschreibung.....	31
1.1.1 Drucklufttechnik.....	32
1.1.2 Hydraulik.....	35
1.1.3 Elektromechanik.....	36
1.1.4 Kriterien zur Technologieauswahl.....	36
1.2 Wirtschaftliche Einordnung des Fachgebiets.....	38
1.3 Energetische Einordnung des Fachgebiets.....	40
1.4 Möglichkeiten und Grenzen der Analyse.....	42
2 Nutzung der Drucklufttechnik und der hydraulischen Antriebe in Deutschland.....	43
2.1 Nutzung der Drucklufttechnik in der deutschen Wirtschaft.....	43
2.1.1 Druckluftbereitstellung durch Kompressoren.....	43
2.1.2 Pneumatik.....	46
2.1.3 Vakuumtechnik.....	47
2.1.4 Energiebedarf der Druckluftherzeugung in Deutschland.....	48
2.2 Nutzung hydraulischer Antriebe im Bilanzraum Deutschland.....	50
2.2.1 Mobile Arbeitsmaschinen.....	50
2.2.2 Energiebedarf mobiler Maschinen.....	52
2.2.3 Stationärhydraulik.....	54
2.2.4 Energiebedarf der Stationärhydraulik.....	54
2.2.5 Hydrauliksysteme in der Luftfahrt.....	56
2.2.6 Verdrängereinheiten.....	57
2.2.7 Nutzung von Druckflüssigkeiten.....	58
2.3 Zusammenfassung.....	58
3 Energieeinsparpotentiale.....	61
3.1 Methodik.....	61
3.2 Einsparpotentiale in der Drucklufttechnik.....	62
3.2.1 Einsparpotentiale in der Druckluftbereitstellung.....	63

3.2.1.1	Einsparpotentiale im Bereich „Steuerung und Regelung“ der Druckluftbereitstellung.....	64
3.2.1.2	Einsparpotentiale im Bereich „Technologieupgrade“	65
3.2.1.3	Einsparpotentiale im Bereich „Dimensionierung“	67
3.2.1.4	Einsparpotentiale durch Leckagebeseitigung.....	68
3.2.1.5	Gesamteinsparpotential der Druckluftbereitstellung	69
3.2.2	Potentiale in Druckluftanwendungen.....	70
3.2.2.1	Vakuumtechnik.....	70
3.2.2.2	Pneumatik-Anwendungen	71
3.3	Einsparpotentiale in der Stationärhydraulik.....	71
3.3.1	Komponenten-Update	72
3.3.2	Steuerungstechnik-Update	74
3.3.3	Update von Antriebssystemen - Modernisierung der Architektur	74
3.3.4	Ganzheitliche Systemoptimierung.....	75
3.4	Einsparpotentiale in der Mobilhydraulik	75
3.4.1	Energieeffizienzpotentiale durch Bediener*innen	75
3.4.2	Update von Antriebssystemen	76
3.4.3	Demonstratoren mit kombinierten Maßnahmen.....	78
3.4.4	Alternative Antriebstechnologien.....	79
3.5	Einsparpotentiale durch die Wahl der Druckflüssigkeit.....	80
3.6	Analyse möglicher Substitutionsbereiche.....	83
3.6.1	Substitution von Vakuumanwendungen	83
3.6.2	Substitution von pneumatischen und hydraulischen Antrieben	84
3.6.2.1	Trends und Entwicklungen in der elektrischen und elektromechanischen Antriebstechnik.....	84
3.6.3	Übersicht der Überschneidungsbereiche Hydraulik – Pneumatik – Elektromechanik – Direktantriebe	88
3.6.4	Vergleich der Leistungsparameter Hydraulik – Pneumatik – Elektromechanik – Direktantriebe.....	90
3.6.4.1	Rotatorische Aktoren.....	90
3.6.4.2	Linearaktoren.....	92
3.6.5	Auswertung der Wettbewerbssituation	95
3.7	Zusammenfassung	96
4	Einsparungsmöglichkeiten und Potentialbewertung.....	98
4.1	Anwendungsbezogene Bewertung der Einsparpotentiale	98

4.1.1	Stationäre Anwendungen: Fördertechnik, Metallurgie, Pressen, Kunststoffmaschinen	98
4.1.2	Mobile Anwendungen: Bagger, Radlader, Traktoren	100
4.1.3	Pneumatik-Anwendungen	101
4.2	Bewertung und Ranking der Einsparpotentiale	102
4.2.1	Methodik zur Potentialbewertung	103
4.2.2	Bewertung möglicher Energieeinsparungen nach Branchen und Anwendungen.....	104
4.3	Zusammenfassung	107
5	Maßnahmen zur Umsetzung	108
5.1	Vergangene und aktuelle Förderrichtlinien	108
5.2	Hemmnisse bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und ihre Beseitigung..	110
5.2.1	Studien zu Hemmnissen bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen	110
5.2.2	Hemmnisse bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen am Beispiel von Druckluftanwendungen	110
5.3	(Mega-)trends mit Einfluss auf die Energieeinsparpotentiale	112
5.4	Zusammenfassung	113
6	Quellenverzeichnis	114
A	Anhang	122
A.1	Methodik zur Ermittlung äquivalenter Kräfte und Leistungen zum Vergleich von Linearantrieben.....	122
A.2	Einzelbewertung der Maßnahmen	135
A.2.1	Potentiale durch Technologieupgrade	136
A.2.2	Potentiale durch Regelungs- und Steuerungstechnik.....	138
A.2.3	Potentiale durch Substitution	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteiliger Energiebedarf der Fluidtechnik in Deutschland und CO ₂ -Ausstoß.....	17
Abbildung 2:	Überschneidungsbereiche von Hydraulik, Pneumatik und elektromechanischen Antrieben nach Leistung.....	20
Abbildung 3:	Ziele Klimaschutzplan 2050	30
Abbildung 4:	Energie- und Leistungstransformation in fluidtechnischen und mechanischen Antrieben.....	32
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Arbeitsbereiche von Druckluftkompressoren.....	34
Abbildung 6:	Klassifizierung von Bewegungsaufgaben.....	37
Abbildung 7:	Anteil der Fluidtechnik am Umsatz der deutschen Wirtschaft	38
Abbildung 8:	Umsatz der Fluidtechnik-Unternehmen in Deutschland 2017.	40
Abbildung 9:	Anteiliger Energiebedarf von Hydraulik und Druckluft am deutschen Gesamtenergiebedarf 2017.....	41
Abbildung 10:	Verkaufszahlen von Kompressoren in Deutschland.....	45
Abbildung 11:	Schematischer Aufbau eines einstufigen Druckluftejektors	48
Abbildung 12:	Branchen in Deutschland mit dem höchsten Stromverbrauch für die Druckluftbereitstellung (Jahr: 2017)	49
Abbildung 13:	Entwicklung und Prognose des Baumaschinenbestands	52
Abbildung 14:	Dieselmotorenbedarf anteilig an Baumaschinen in Deutschland, nach Typ	53
Abbildung 15:	Annahme des Energiebedarfs nach elektromotorgetriebenen Anwendungen	55
Abbildung 16:	Mechanische Energie aus Elektroenergie	56
Abbildung 17:	Jahresproduktion von Hydropumpen: Stückzahlen und Umsatz 2017.....	57
Abbildung 18:	Schmierstoffverkauf in Deutschland 2018	58
Abbildung 19:	Energiebedingte Emissionen* in Deutschland 2018, Anteil Fluidtechnik	59
Abbildung 20:	Methodik zur Ermittlung der Energieeinsparpotentiale in der Druckluftbereitstellung in Deutschland.....	64
Abbildung 21:	Spezifisches Einsparpotential in Abhängigkeit der Unternehmensgröße auf Basis von 65 auditierten Unternehmen	70
Abbildung 22:	Standards für Motoren Mindestwirkungsgrade IEC 60034-30..	72
Abbildung 23:	Vergleich einer Digital-Displacement-Pumpe mit verschiedenen Axialkolbenpumpen.....	73
Abbildung 24:	Wirkungsgradkennfelder von ausgewählten Verdrängereinheiten im Vergleich	74
Abbildung 25:	Betriebszeiten und Kraftstoffverbrauch verschiedener mobiler Maschinen	76

Abbildung 26:	Abhängigkeit der Viskosität verschiedener Viskositätsklassen von der Temperatur	80
Abbildung 27:	Zusammenhang zwischen Wärmeverlusten und Viskosität (schematisch).....	81
Abbildung 28:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehzahl, Lastmoment, Druckfluid und Temperatur	82
Abbildung 29:	Verbesserung des Pumpenwirkungsgrades in Abhängigkeit von VI und Temperatur	82
Abbildung 30:	wichtige Trends in der elektrischen Antriebstechnik	85
Abbildung 31:	Übersicht der Alternativen zu hydraulischen Antrieben.....	89
Abbildung 32:	Übersicht der Alternativen zu pneumatischen Antrieben	89
Abbildung 33:	Leistungsdichte (bezogen auf die Nennleistung) und Masse von Rotationsantrieben.....	91
Abbildung 34:	Überdeckung der massebezogenen spezifischen Leistung für pneumatische, hydraulische und elektrische Rotationsantriebe (basierend auf Abbildung 33)	92
Abbildung 35:	Leistungsdaten elektromechanischer und hydraulischer Linearantriebe	93
Abbildung 36:	Überdeckung der flächenbezogenen (auf die Flanschfläche) spezifischen Leistung für pneumatische, hydraulische und elektrische Linearantriebe (vgl. Anhang A.1)	94
Abbildung 37:	Überschneidungsbereiche der Technologien.....	95
Abbildung 38:	Mindesteffizienz von Kompressoren um eine BAfA-Förderung zu erhalten inkl. Darstellung des technischen Optimums (violett)	109
Abbildung 39:	Spezifische Aktorkraft bei hoher Ausnutzung	124
Abbildung 40:	Spezifische Leistung bei hoher Ausnutzung	125
Abbildung 41:	Spezifische Aktorkraft bei geringer Ausnutzung	126
Abbildung 42:	Spezifische Leistung bei geringer Ausnutzung	127
Abbildung 43:	Spezifische Aktorkraft und -leistung bei hoher Ausnutzung – gesamter betrachteter Bereich	128
Abbildung 44:	Spezifische Aktorkraft und -leistung bei geringer Ausnutzung – gesamter betrachteter Bereich	129
Abbildung 45:	Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei hoher Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor)	132
Abbildung 46:	Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei geringer Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor)	133
Abbildung 47:	Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei hoher Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor) – bis 10 kg Aktormasse	134

Abbildung 48:	Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei geringer Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor) – bis 10 kg Aktormasse	135
---------------	--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einsatzbereiche hydraulischer Antriebe nach Wirtschaftssectoren	35
Tabelle 2:	Maschinenproduktion in 2018 – „Fluidtechnik-Branchen“	38
Tabelle 3:	Einsatzbereiche der Drucklufttechnik nach Wirtschaftssectoren	43
Tabelle 4:	Umsatz der Verkäufe von Kompressoren in Deutschland.....	45
Tabelle 5:	Absätze von Baumaschinen in Deutschland und Westeuropa.	50
Tabelle 6:	Bestände von Baumaschinen	51
Tabelle 7:	Energiebedarf mobiler Maschinen	53
Tabelle 8:	Ermittlung von Maßnahmen > TRL 5 nach Technologiebereichen	61
Tabelle 9:	Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Steuerung und Regelung“	65
Tabelle 10:	Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Technologieupgrade“	67
Tabelle 11:	Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Dimensionierung“	68
Tabelle 12:	Maßnahmen und Einsparpotentiale in der Pneumatik	71
Tabelle 13:	CO ₂ -Bilanz mechanischer Energie an der Motorwelle	79
Tabelle 14:	Bewertungstabelle zur QFD-Analyse der Energiesparmaßnahmen	103
Tabelle 15:	Ranking der anwendungsbezogenen Einsparmaßnahmen	104
Tabelle 16:	Vergleich der spezifischen flächenbezogenen Aktorkräfte und Leistungsdichten von Elektrozylindern, Solenoid-Linearmotoren, Hydraulikzylindern und Pneumatikzylindern.....	130
Tabelle 17:	Potentialbewertung der Maßnahmen „Technologieupgrade“	136
Tabelle 18:	Potentialbewertung der regelungs- und steuerungstechnischen Maßnahmen	138
Tabelle 19:	Potentialbewertung der Energieeinsparungen durch Substitutionsmaßnahmen	139

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
Bafa	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
bzgl.	bezüglich
C_dyn	Dynamische Tragzahl (hier für Gewindetriebe)
ca.	circa
CAGI	Compressed Air and Gas Institute
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
e.g.	exempli gratia (zum Beispiel)
EDL-G	Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen
EneffAH	Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik (Projektname)
ErP	Energy related Products
F_30000km	Last zum Erreichen einer Lebensdauer von 30000km
F_Lastkollektiv	effektiv für die Lebensdauerprognose eines Wälzkontaktes wirksame Kraft des zu Grunde liegenden Lastkollektivs
F_max	Spitzenkraft (hier für den Solenoid-Linearmotor)
F_nat_Konv	Dauernennkraft bei Kühlung durch natürliche Konvektion (hier für den Solenoid-Linearmotor)
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
FVB	Forschungsvereinigung Baumaschinen
GGT	Gleitgewindetrieb
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
i.e.	id est (das heißt)
IE / IE4	International Efficiency von Elektromotoren nach IEC 60034-30
IEA	International Energy Agency
IMM	Institut für Mechatrischen Maschinenbau der TU Dresden (Autor der Studie)
incl.	inklusive
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KGT	Kugelgewindetrieb
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
L_Bezug	Bezugslebensdauer für wälzkontaktbehaftete Maschinenelemente
L_N	Lebensdauer eines wälzkörperbasierten Gewindetriebs in Umdrehungen
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LD	Lebensdauer
n.d.	no date - ohne Jahr
QFD	Quality Function Development (Qualitätsfunktionendarstellung)
RGT	Rollengewindetrieb

Abkürzung	Bedeutung
SGM	Spritzgießmaschine
SL	Solenoid-Linearmotor
TCO	Total Cost of Ownership
TRL	Technology-Readyness-Level nach DIN EN 16603-11
u.v.m.	und vieles mehr
usw.	und so weiter
v.A.	vor Allem
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
VG	Viskositätsklasse
VI	Viskositätsindex
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Zusammenfassung

Um den CO₂-Ausstoß, der den Klimawandel signifikant beschleunigt zu reduzieren hat die Bundesregierung im Klimaschutzplan 2050 bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 55%, bezogen auf die Emissionen im Jahr 1990, festgelegt. Folglich ist es zweckmäßig, auch in der Antriebstechnik nach Energieeinsparpotentialen zu suchen.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Reduzierungen des CO₂-Ausstosses im Einsatzbereich der Fluidtechnik (Hydraulik und Pneumatik) zu analysieren und zu prüfen, inwieweit ein Ersatz fluidtechnischer Antriebe durch elektromechanische Antriebe technisch, energetisch und wirtschaftlich möglich beziehungsweise sinnvoll sein kann. Sie stellt insofern eine technologieübergreifende Grundlage für die Diskussion von Energieeinsparungen in der Fluidtechnik dar.

Im ersten Schritt erfolgt eine Abschätzung des Energiebedarfs der Fluidtechnik im Bilanzraum Deutschland. Nach einer grundlegenden Beschreibung der Technologien in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 die Branche in die Bereiche Industriehydraulik, Mobilhydraulik und Pneumatik unterteilt. Da die Pneumatik nur einen Teilbereich der Druckluftnutzung abdeckt wird die Druckluftherzeugung zusätzlich betrachtet.

Es liegen keine mengen- und wertmäßigen Erhebungen zu den im Bilanzraum Deutschland betriebenen fluidtechnischen Maschinen und Anlagen vor. Aus diesem Grund wird der Energiebedarf der Fluidtechnik in Deutschland im ersten Schritt aus Wirtschafts- und Energiedaten für jeden der einzelnen Bereiche abgeschätzt. Darauf basierend wird der jährliche CO₂-Ausstoß der Fluidtechnik in Deutschland berechnet.

Kapitel 3 ist der Untersuchung der Fluidtechnik-Branche im Hinblick auf Energieeinsparpotentiale gewidmet. Hierbei werden die Veröffentlichungen der letzten 20 Jahre auf Technologieentwicklungen untersucht, die signifikante Einsparpotentiale für im Betrieb befindliche Maschinen und Anlagen bedeuten könnten. Hierbei werden nur Entwicklungen betrachtet, die über ein Technology-Readiness-Level (TRL) von mindestens 5 verfügen, also mindestens als Demonstrator im Betrieb erprobt wurden. Diese Einschränkung wurde vorgenommen um nur Technologien zu bewerten, die in naher Zukunft zum Einsatz kommen können. Auch die Entwicklung der elektromechanischen Linear- und Rotationsantriebe wird in diesem Zug analysiert, um die Potentiale aller Antriebstechnologien im Vergleich berücksichtigen zu können. Der Bereich in dem sich die Einsatzbereiche der verschiedenen untersuchten Technologien überschneiden wird anhand einer Marktanalyse identifiziert. Für diesen Bereich ist folglich eine Substitution der Fluidtechnik durch elektromechanische Antriebe leistungsmäßig möglich.

In Kapitel 4 wird die Anwendung der technisch möglichen Energiesparmaßnahmen in den Branchen der Fluidtechnik analysiert, die große Mengen Energie umsetzen. Anhand wichtiger Anwendungen der Stationär- und Mobilhydraulik sowie der Pneumatik und in der Druckluftherzeugung wird anwendungsbezogen analysiert, ob Energieeinsparpotentiale mit steuerungs- und regelungstechnischen Maßnahmen, durch Erneuerung der Technologie (Upgrade) oder den Einsatz einer anderen Antriebstechnik (Substitution) erreicht werden können. Die hierzu eingesetzte Methodik führt zu einer branchenübergreifenden Punktbewertung der Energieeinsparpotentiale.

In Kapitel 5 wird abschließend analysiert, welche Hemmnisse heute bei der Umsetzung dieser Maßnahmen existieren. Hierzu werden vergangene und aktuelle Förderrichtlinien und (Mega-)trends, die Einfluss auf die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen haben, benannt.

Die Fluidtechnik (Hydraulik und Drucklufttechnik) bezeichnet die Anwendung geförderter oder unter Druck stehender Gase und Flüssigkeiten zu Erzeugung, Steuerung und Regelung von

Kräften und Bewegungen und ist ein Teilgebiet der Antriebstechnik. Die Fluidtechnik ist eine Querschnittstechnologie, welche insbesondere in der Industrie und dem produzierenden Gewerbe darüber hinaus aber auch in nahezu allen Bereichen des öffentlichen Lebens Anwendung findet. Insbesondere die Vorteile der einfachen Erzeugung linearer Bewegungen, der zentralen Energiewandlung und der großen Leistungsdichte machen den Einsatz in einer großen Vielfalt an Anwendungen vom Tagebaubagger bis zur Dosierung von Medikamenten möglich. Damit geht ein in der Summe signifikanter Energieeinsatz einher.

Dabei liegen zum Energieumsatz der Fluidtechnik im Bilanzraum Deutschland nur wenige Informationen vor. Es gibt keine Veröffentlichungen zum Energiebedarf der Fluidtechnik. Veröffentlichungen die Energiebedarfe abschätzen betreffen die Druckluftherzeugung. Eine Studie, die eine grobe Abschätzung des Druckluftbedarfes in der EU vornimmt datiert aus dem Jahr 2001 und wird heute als Bezugspunkt für die Angabe des jährlichen deutschen Energiebedarfs der Druckluft genutzt. Für die hydraulische Antriebstechnik liegen keine derartigen Veröffentlichungen vor. Eine US-Studie (Love et al., 2012) die auf empirischen Erhebungen basiert führt Energiebedarfsabschätzungen für die Vereinigten Staaten durch, deren Ergebnisse für Deutschland weder plausibilisiert noch übertragen werden können.

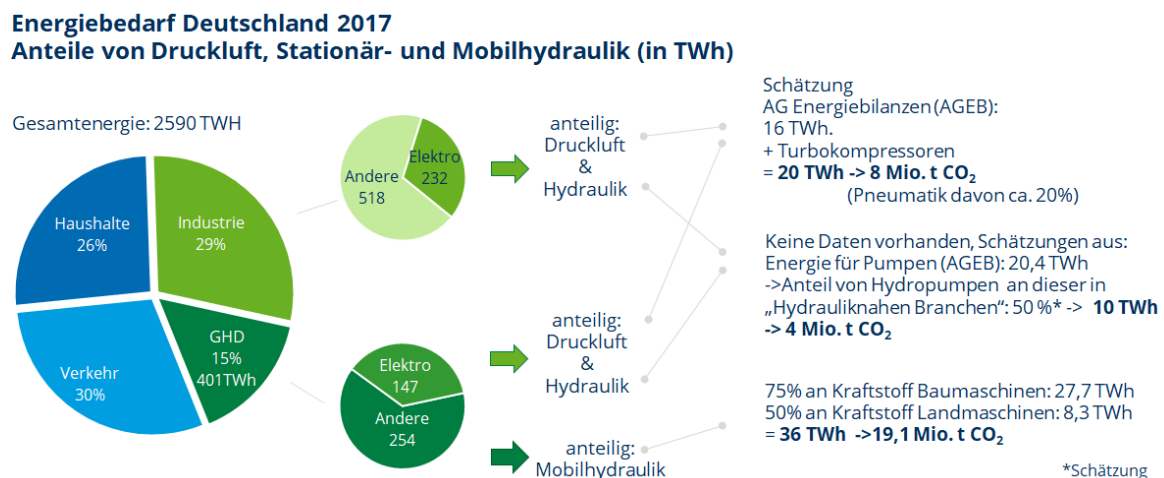
Fluidtechnik wird in vielen Sektoren von Industrie, Handel und Gewerbe genutzt. Die Anwendungen lassen sich in Druckluft (mit Untergruppe Pneumatik), Stationär-, Mobil- und Flugzeughydraulik aufteilen:

- ▶ Die Erzeugung von Druckluft erfolgt mit Kompressoren. Schrauben- und Kolbenkompressoren sind für circa 80% des Energiebedarfs der Druckluftbereitstellung verantwortlich. Die restlichen 20% sind auf Turbokompressoren zurückzuführen, die über Leistungen im Megawattbereich verfügen und teilweise mit Brennstoffen betrieben werden. Dieselbetriebene Kompressoren, wie sie etwa auf Baustellen Verwendung finden werden bei der Energiebetrachtung vernachlässigt. Ca. 80% der Druckluft wird als Aktivluft (z.B. zum Schüttguttransport), als Prozessluft (z.B. zum Kühlen, Trocknen oder Zerstäuben) oder Prüfluft verwendet. Ihre Anwendungen werden in diesem Bericht nicht untersucht. Ca. 20% der Druckluft wird in der Antriebstechnik in pneumatischen Systemen verwendet, die hier näher betrachtet werden.
- ▶ Ortsfeste Maschinen und Anlagen, die hydraulisch betrieben werden, werden beinahe ausschließlich am Stromnetz betrieben. Aus diesem Grund bildet die Stationärhydraulik, der als bekannteste Vertreter Pressen und Kunststoffspritzgießmaschinen angehören, einen eigenen Untersuchungsbereich.
- ▶ Mobilhydraulische Maschinen sind ortsveränderliche bediener*innen geführte Maschinen, die in der überwiegenden Mehrzahl über einen Dieselmotor angetrieben werden und deshalb getrennt betrachtet werden. Die mengenmäßig größten Gruppen mobilhydraulischer Maschinen sind Bagger, Radlader und Traktoren.
- ▶ Hydraulische Antriebe werden auch im Bereich der zivilen und militärischen Luftfahrt eingesetzt. In diesem Segment sind zum Erzielen geringerer CO₂-Emissionen deutlich abweichende Randbedingungen (Gewicht, Sicherheit, Entwicklungszeiten, ...) wirksam. Zusätzlich sind aus Geheimhaltungsgründen keine Daten verfügbar. Der Anwendungsbereich wird in dieser Studie nicht betrachtet.

Circa 620 Milliarden € oder 18% des Gesamtumsatzes der deutschen Volkswirtschaft wurden 2018 von den Betrieben des Bau- und verarbeitenden Gewerbes erzeugt. Daran haben die Fluidtechnik-Unternehmen einen Anteil von 4 %. Die Fluidtechnik ist eine Zulieferbranche, deren Bedeutung sich auch am Umsatz der Kundenbranchen (Unternehmen, die Hydraulik oder Pneumatik als Technologie einsetzen) messen lässt, die 55% der deutschen Maschinenproduktion ausmachen. Gemessen an den wirtschaftlichen Kennzahlen ist die Fluidtechnik eine wichtige Branche des deutschen Maschinenbaus, die durch Effizienzsteigerungen deutlich zur Reduktion des CO₂-Ausstosses beitragen kann. Besonders hohe Anteile fluidtechnischer Antriebe finden sich in den Branchen Bau- und Baustoffmaschinen, Förder- und Landtechnik, Werkzeugmaschinen sowie Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Die mengenmäßige Verbreitung von Fluid- und Antriebstechnik in Deutschland lässt sich anhand der Wirtschaftsdaten nicht bestimmen. Die Menge der exportierten sowie der importierten Produkte sowie die Nutzungszeit der Komponenten und Anlagen kann ohne Feldstudien nicht ermittelt werden. Solche Studien liegen – auch in kleinerem Umfang – für Deutschland nicht vor. Schlussfolgerungen zur energetischen Bilanz dieser Antriebstechnologie lassen sich aus den Wirtschaftsdaten nicht ableiten.

Die Bestimmung der CO₂-Emissionen erfolgt für die Anwendungsbereiche Druckluft (Pneumatik), Mobil- und Stationärhydraulik über die Daten der AG Energiebilanzen, Veröffentlichungen zu Bestand und Nutzung mobiler Maschinen sowie anhand eigener Berechnungen und Abschätzungen unterstützt durch die Expertise der Industrieunternehmen Bosch Rexroth AG (Hydraulik), Festo AG (Pneumatik), Liebherr (Mobilhydraulik), Panolin (Druckflüssigkeiten) und des Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenhersteller (VDMA).

Abbildung 1: Anteiliger Energiebedarf der Fluidtechnik in Deutschland und CO₂-Ausstoß



Datenquellen: DESTATIS, AGEB, eigene Berechnungen. Darstellung IMM

Abbildung 1 zeigt die Aufteilung der Gesamtenergie in Deutschland im Jahr 2017 sowie die Aufteilung bezogen auf die Fluidtechnik. Der Betrieb fluidtechnischer Systeme in Deutschland setzt nach den vorgenommenen Abschätzungen jährlich bis zu 25 Millionen Tonnen CO₂-frei, von denen etwa drei Viertel durch den Ausstoß mobiler Maschinen verursacht wird. Der CO₂-Ausstoß für die Produktion von Systemen und Komponenten im Sinne eines „CO₂-Footprints“ ist in dieser Betrachtung nicht enthalten.

Die Energieeffizienz der Technologie ist ein Schlüssel zur Reduzierung des Energiebedarfs und damit auch des CO₂-Ausstoßes. Die Effizienzpotentiale können auf der Ebene einzelner Komponenten, von Subsystemen oder ganzer Maschinen und Anlagenverbünde durch strukturelle oder steuerungstechnische Anpassungen erschlossen werden. Über die Höhe der

verfügbaren Energieeinsparpotentiale in Komponenten, Systemen sowie Maschinen und Anlagen der Fluidtechnik liegen bislang keine Berechnungen vor.

Zur Einsparung von Energie werden verschiedene potentielle Maßnahmen auf der Ebene von Komponenten, Systemarchitekturen, der Systemsteuerung oder dem Einsatz alternativer Technologien auf der Basis einer grundsätzlichen technischen Machbarkeit vorgestellt. Die Recherche umfasst dabei Maßnahmen, die mindestens in einem Prototyp realisiert und validiert wurden.

Im Bereich der pneumatischen Antriebstechnik wurden Einsparpotentiale in 3 verschiedenen Kategorien ermittelt. Austausch und Verbesserung von Komponenten bieten geringes Potential für die Einsparung von Energie, da die marktverfügbaren Komponenten einen hohen technologischen Reifegrad besitzen. Mittleres Potential besteht durch Änderungen der Anlagentopologie: Der Einsatz von Energiesparschaltungen, die Einführung verschiedener Druckniveaus sowie eine ganzheitliche Betrachtung vom Kompressor bis zum Aktor können Energie einsparen. Das größte Einsparpotential besteht bei der Dimensionierung der Antriebe. Insbesondere fehlendes methodisches Know-How ist in der Praxis ein Hemmnis bei der energieeffizienten Auslegung pneumatischer Antriebssysteme. Die in den letzten 10 Jahren erforschten Methoden haben bislang wenig Einzug in die Praxis gefunden.

In stationärhydraulischen Antrieben bestehen Einsparpotentiale im kleinen und mittleren einstelligen Prozentbereich durch den Austausch von Elektromotoren und Komponenten durch neuere Fabrikate mit verbesserten Wirkungsgraden. Steuerungstechnisch können große Energieeinsparungen durch die temporäre Stillsetzung von Antrieben erschlossen werden. Dies ist jedoch stark anwendungsabhängig und unter Umständen auch von weiteren Faktoren wie z.B. der Temperierung der Maschine abhängig. Die größten Potentiale lassen sich durch das Update der Antriebsstränge der Maschinen erschließen. Hier liegen insbesondere im Ersatz von ventilgesteuerten durch verdrängergesteuerte Systeme sowie dem Einsatz dezentraler (verdrängergesteuerter) Antriebseinheiten große Potentiale. Beim Parallelbetrieb von Aktoren an zentralen Netzen können sich durch eine systematische Auslegung und die Anpassung von Aktoren und Druckniveau Leistungseinsparungen erzielen lassen. Die Substitution hydraulischer Linearantriebe durch elektromechanische Gleitgewindetriebe (GGT), Kugelgewindetriebe (KGT) und Rollengewindetriebe (RGT) ist im Kraftbereich bis 1000 kN Aktorkraft heute in vielen Anwendungen technisch möglich. Könnten in der Stationärhydraulik Energieeinsparungen zwischen 10% und 20% umgesetzt werden ist mit einer CO₂-Einsparung in Höhe von 0,4 Megatonnen CO₂ zu rechnen – rechnerisch dem CO₂-Ausstoß einer Stadt der Größe von Ravensburg (50.500 Einwohner, Durchschnitt 2019). Unter welchen Bedingungen die Einsparungen von den Unternehmen wirtschaftlich umgesetzt werden können, ist zu anwendungsspezifisch um allgemeingültig beantwortet werden zu können.

Mobilhydraulische Systeme aus Land-, Forst- und Bauwirtschaft verfügen über große Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz neuer Hydraulik-Architekturen. Ähnlich wie in der Stationärhydraulik können durch die Wahl der Architektur und die Optimierung der Antriebstopologien große Einsparpotentiale erschlossen werden. Weitere große Einsparungen können durch die Stillsetzung von Maschinen durch Bediener*innen oder eine Start-Stopp-Automatik erreicht werden.

In Mobilanwendungen ist die Substitution hydraulischer Antriebe durch elektromechanische Antriebe ohne den Ersatz von Verbrennungsmotoren (mit fossilen Energieträgern betrieben) durch Elektromotoren (mit regenerativ gewonnener Elektroenergie betrieben) ökologisch nicht sinnvoll. Technologisch sind elektrische Radantriebe bereits heute umsetzbar. Für kleinere Mobilmaschinen ist der Einsatz elektromechanischer Linearantriebe technisch möglich. Durch den Einsatz neuer Architekturen wie die Trennung der Steuerkanten sowie die Vermeidung von Leerlaufzeiten sind Potentiale in Höhe von 15% bis 40% möglich, was einer CO₂-Einsparung von

2,9 bis 7,6 Mio. t CO₂ pro Jahr entsprechen würde – rechnerisch einer Stadt der Größe Kölns als viertgrößte Stadt Deutschlands.

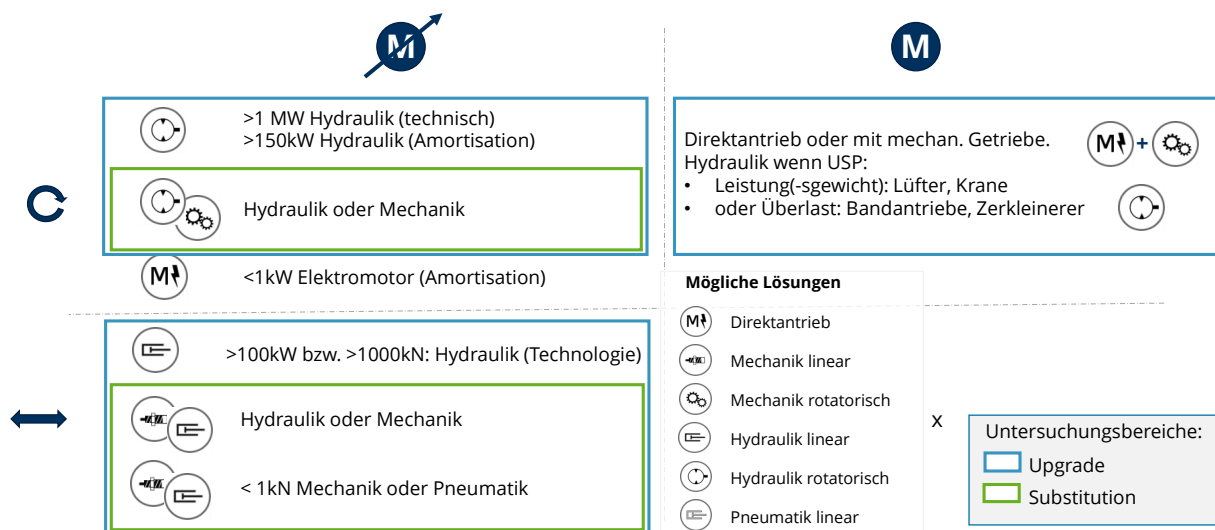
Heute kommen in hydraulischen Applikationen überwiegend mineralölbasierte Druckflüssigkeiten zum Einsatz. Dabei besteht der Konflikt zwischen dem Erhalt der Schmierfähigkeit bei höheren Temperaturen und der Höhe der Strömungsverluste bei hohen Viskositäten. Der Einsatz möglichst niedrigviskoser Flüssigkeiten sollte angestrebt werden, scheitert jedoch in der Anwendung, da häufigere Systemausfälle befürchtet werden und es noch wenige Langzeiterfahrungen gibt. Energieeinsparungen in Höhe von 3-5% sind im Betrieb von Spritzgussmaschinen in Langzeitversuchen ohne Mehrkosten nachgewiesen.

Auch durch den Wechsel der Technologie kann mitunter Energie eingespart werden. Dies setzt eine technische Gleichwertigkeit voraus, die nur in einem definierten Leistungsbereich gegeben ist. Anhand einer Marktrecherche werden die Überschneidungsbereiche von Kraft- und Leistungsdichte von Hydraulik, Pneumatik und elektromechanischen Linear- und Rotationsantrieben aufgezeigt.

Grundsätzlich lässt sich der mögliche Substitutionsbereich für hydraulische und pneumatische rotatorische Antriebe hin zu kleinen Massen durch die Anforderung der Miniaturisierung (<0,1 kg) und bzgl. geringer Leistungsdichten (<10 W/kg) abgrenzen. Bzgl. hoher Leistungsdichten oberhalb von 1000 W/kg kommen praktisch nur Hydraulikmotoren in Frage. Oberhalb von 10 t Eigenmasse sind nur noch Kleinstserien oder Einzelanfertigungen relevant, die jeweils spezifisch auf die Anwendung hin optimiert werden.

Insgesamt betrachtet ist der Überschneidungsbereich rotatorischer hydraulischer, pneumatischer und elektrischer Antriebe überschaubar. Dies betrifft vor allem den Bereich stationärer Anlagen, wobei aber die Peripherie und weitere Randbedingungen berücksichtigt werden müssen (Bereitstellung des Druckmediums, technische Anforderungen bspw. bzgl. Robustheit und Sicherheit gegen Überlast). In mobilen Maschinen ist eine Substitution von Hydraulikmotoren an den Übergang zu alternativen Antriebskonzepten gekoppelt. So lange die zentrale Energiebereitstellung mechanisch (Verbrennungskraftmaschine) erfolgt, bleibt der Einsatz elektrischer Fahrtriebe wahrscheinlich unwirtschaftlich. Pneumatikmotoren können technisch gesehen weitgehend durch elektrische Antriebe substituiert werden. Wegen geringer Stückzahlen sowie weiteren technologischen Randbedingungen wie dem Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen, ist das Substitutionspotential insgesamt gering.

Hydraulische Zylinderantriebe sind bei hohen Leistungsanforderungen und Kräften allen anderen Linearantrieben überlegen. Der technisch mögliche Bereich für den Einsatz elektromechanischer Linearantriebe kann etwa auf Leistungen <100 kW und Kräfte <1000 kN eingegrenzt werden. Moderne Elektrozyylinder verfügen vereinzelt auch über Leistungen- und Kräfte oberhalb dieser Grenzen. Bei elektromechanischen Linearantrieben ist die Laufleistung von der Belastung abhängig, was bei der Auslegung berücksichtigt werden muss. Pneumatische Zylinderantriebe liegen in einem Kraft- und Leistungsbereich der durch elektromechanische Linearantriebe (bspw. Elektrozyylinder mit Gleitgewindetrieb (GGT), mit Kugelgewindetrieb (KGT) und Rollengewindetrieb (RGT)) sowie Linearmotoren und bei kleinen Leistungen prinzipiell auch durch unkonventionelle Aktoren abgedeckt wird. Die Substitution von pneumatischen Linearantrieben ist in einem weiten Bereich grundsätzlich technisch möglich. Eine Übersicht der Analyse der Überschneidungsbereiche der Leistungsdaten der Antriebstechnologien zeigt **Abbildung 2**.

Abbildung 2: Überschneidungsbereiche von Hydraulik, Pneumatik und elektromechanischen Antrieben nach Leistung

Quelle: eigene Darstellung IMM

Die identifizierten Untersuchungsbereiche dienen im Folgenden als Grundlage der anwendungsspezifischen Untersuchung in wichtigen Applikationen.

Die betrachteten Technologien Hydraulik, Pneumatik und Elektromechanik weisen heute kein generelles disruptives Potential in dem Sinne, dass ein Technologieersatz bei besserer Performance oder deutlich geringeren Kosten erfolgen könnte, auf. Der Einsatz aller Technologien in bewährten industriellen Lösungen bestätigt dies. Bezüglich der beschriebenen allgemeinen Energieeinsparpotentiale gelten in jeder Anwendung (neben der Wirtschaftlichkeit) weitere technische Restriktionen, die sich maschinenabhängig deutlich unterscheiden können. Die Analyse der möglichen Einsparungen und ihre Bewertung müssen also anwendungsspezifisch getroffen werden. Fluidtechnische Anwendungen werden auf mögliche Potentiale durch steuerungs- und regelungstechnischen Maßnahmen, durch Updates der Komponenten und Systemarchitektur sowie auf eine Substitution durch elektromechanische Antriebe untersucht. Hierzu werden Anwendungen kategorisiert und konkrete Applikationen mit erwartetem hohem Einsparpotential analysiert und bewertet. Anhaltspunkte für quantitativ großes Einsparpotential sind Anwendungen mit großer installierter Leistung, langen Betriebszeiten einzelner Maschinen sowie eine große Stückzahl in einer Maschinenkategorie.

Die Einsparpotentiale werden auf Basis einer Bewertungsmethodik nach der erwarteten Energieeinsparung nach Durchführung der Maßnahmen miteinander verglichen. Im Ergebnis steht eine nach Einsparpotential gewichtete Liste mit Maßnahmen aus den Kategorien:

1. Regelungs- und Steuerungstechnik
2. Update
3. Substitution

für die Anwendungen aus den Bereichen Druckluft (insbes. Vakuumerzeugung und Pneumatik), Stationär- und Mobilhydraulik zur Verfügung.

Konkrete Energiesparmaßnahmen mit sehr hohen zu erwartenden Energie- und damit CO₂-Einsparungen sind aus technischer Sicht:

- ▶ Die Unterstützung der Anwender*innen bei der Auswahl energieeffizienter Systeme. Eine korrekte Auslegung von Antrieben und Komponenten könnte 80% der pneumatischen Systeme verbessern mit Einsparungen bis zu 40%.
- ▶ Die Umstellung von Ziehkissen in Tiefziehpressen von Ventil- auf Verdrängersteuerung. Dies betrifft alle größeren Tiefziehpressen und birgt Einsparpotentiale in Höhe von bis zu 30%. Bis 2024 ist diese Technologie mit einem Patent geschützt; sie wird aktuell nicht angewendet.
- ▶ Vermeidung von Leerlauf in mobilhydraulischen Systemen, insbesondere Baggern und Radladern. In Leerlaufzeiten benötigt die Versorgung von Nebenverbrauchern ca. 50% der Leistung im Nennbetrieb. Stillstandszeiten bei Baggern und Radladern machen in Feldversuchen bis zu 44% der Betriebszeiten aus. Die Einführung von Start-Stop-Automatiken, wie sie aus dem KFZ-Bereich bekannt sind könnte zu großen Einsparungen führen.
- ▶ Die Anwendung zustandsorientierter Wartungskonzepte ist in allen Komponenten in Maschinen und Anlagen denkbar. Durch die Verlängerung der Einsatzzeiten und eine Vermeidung von Ausfällen kann die Herstellung Neuer und die Entsorgung alter Komponenten reduziert und die CO₂-Bilanz verbessert werden.
- ▶ Die Substitution der Schneckenantriebe in Spritzgießmaschinen, die in der Regel aus Kostengründen mit einfachen Hydraulikmotoren mit geringem Wirkungsgrad ausgeführt sind, durch Servo-Direktantriebe birgt große energetische Potentiale. In der Praxis scheitert diese Maßnahme häufig an den vergleichsweise höheren Investitionskosten.
- ▶ Die Anpassung der Viskositätsklasse hin zur niedrigstmöglichen Viskosität im Betrieb birgt Energieeinsparpotentiale von 3 bis 5%, was in Langzeittests mit Spritzgießmaschinen nachgewiesen wurde. Diese Maßnahme ist ohne Mehrkosten kurzfristig realisierbar.
- ▶ Der Einsatz von Energiesparschaltungen in der Pneumatik birgt große Potentiale. Darüber hinaus können durch die Nutzung der Expansionsenergie im Vergleich mit Standard-Pneumatik in der Praxis in 30% der Schaltungen bis zu 65% der Druckluft eingespart werden.
- ▶ Hydraulisch angetriebene Spritzgießmaschinen können heute ventil- oder verdrängergesteuert betrieben werden. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Dynamik von Verdrängersteuerungen ermöglichen auch hier hochdynamische Bewegungen – bei wesentlich besserem Systemwirkungsgrad. Eine Umstellung auf verdrängergesteuerte Maschinen birgt große energetische Einsparpotentiale.
- ▶ In Druckluftsystemen treten oftmals vermeidbare Druckverluste auf. Durch regelmäßige Wartung der Druckluft-Aufbereitung sowie die richtige Dimensionierung kann die Effizienz verbessert werden. Pro bar Druckverlust können circa 8% Energie eingespart werden
- ▶ Schätzungsweise 80% der Druckluftanlagen haben Leckagen im zentralen Druckluftnetz, in denen bis zu 30% der Druckluft verloren geht. Weitere Verluste treten in Zuleitungen, Komponenten Schätzungen zufolge können ca. 5% Energie eingespart werden, wenn

Leckagen im zentralen Netz konsequent beseitigt werden. Zusätzliche Einsparpotentiale ergeben sich durch Beseitigung von Leckagen in den Komponenten.

Eine detaillierte wirtschaftliche Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen vorzunehmen ist aufgrund von zahlreichen Nebenbedingungen nicht allgemeingültig möglich.

Eine grobe Abschätzung des mittelfristigen Einsparpotentials der Technologie auf Basis der untersuchten Anwendungen liegt bei durchschnittlich 18%, die sich aus ca. 15% Einsparungen in der Mobilhydraulik, 20% in der Stationärhydraulik und 25% in der Druckluftherzeugung sowie den pneumatischen Antrieben ergibt. Die konsequente Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen, könnte rechnerisch zu Einsparungen in Höhe von bis zu 6 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in Deutschland führen, was circa 0,7% des gesamten deutschen CO₂-Ausstoßes im Jahr 2018 ausmacht.

Den vorgeschlagenen technisch sinnvollen Energieeinsparpotentialen stehen Hemmnisse gegenüber, die eine Umsetzung in der Praxis verhindern. Sie lassen sich in personalpolitische und wirtschaftliche Hemmnisse unterteilen. Die Kenntnis und das fachliche Verständnis einer Maßnahme ist Bedingung für eine Einschätzung des vorliegenden anwendungsbezogenen Einsparpotentials. Die Visualisierung von Energieströmen kann ein wirksames Mittel sein, die Sensibilität für Energieeinsparungen zu erhöhen. Auch kundenseitig kann die Visualisierung eines ökologischen Footprints positive Effekte erzielen. Weitere Faktoren wie die Priorität von Einsparmaßnahmen, die Motivation der Mitarbeiter oder Entscheidungsstrukturen in Unternehmen sind Faktoren, die unabhängig von der technischen Machbarkeit erheblichen Einfluss auf die Umsetzung von Einsparmaßnahmen haben.

Das wesentliche wirtschaftliche Hemmnis ist oftmals die mangelnde Rentabilität von Maßnahmen in den vorgegebenen Amortisationszeiten. Umfrageergebnisse lassen darüber hinaus den Rückschluss zu, dass die durchgeführten Maßnahmen sich in der Regel nicht durch die Energiekosten allein refinanzieren lassen, insbesondere, wenn im industriellen Umfeld übliche Abschreibungsfristen von zwei bis drei Jahren angenommen werden. In der Folge werden Maßnahmen als „Begleitmaßnahmen“ im Rahmen anderer Modernisierungen umgesetzt und somit deutlich später in der Breite realisiert.

Die zum Erreichen der Klimaziele gesetzten politischen Randbedingungen sind neben dem steigenden Bewusstsein für den Klimawandel ein wesentlicher Faktor zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen in Unternehmen. Daneben stellen freiwillige Selbstverpflichtungen großer Unternehmen zur CO₂-neutralen Produktion einen wichtigen Orientierungspunkt für kleinere Unternehmen dar.

Summary

In order to reduce CO₂ emissions, which are significantly accelerating climate change, the German government has set a 55% reduction in CO₂ emissions (compared to 1990's emissions) by 2030 in its Climate Protection Plan 2050. It is therefore appropriate to have a look on energy saving potentials in drive technology as well.

The present study analyses the reductions in CO₂ emissions in the field of fluid power (hydraulics & compressed air technology) and examines if and if so to what extent a replacement of fluid power drives by electromechanical drives is possible or reasonable from a technical and energetic point of view. In this respect, it represents a cross-technology basis for the discussion of energy savings in fluid power engineering.

The first step is to estimate the energy requirement of fluid power in the balance area of Germany. After a basic description of the technologies in chapter 1, chapter 2 divides the sector into the areas of industrial hydraulics, mobile hydraulics and pneumatics. Since pneumatics only covers a partial area of compressed air use, the generation of compressed air is also considered.

There are no quantitative or value-based surveys of the fluid technology machinery and systems operated in the balance area of Germany. For this reason, the energy requirements of fluid power in Germany are estimated in a first step from economic and energy data for each of the individual areas. On this basis, the annual CO₂ emissions of fluid power in Germany are calculated.

Chapter 3 is dedicated to the investigation of the fluid power industry with regard to energy saving potentials. Here, publications of the last 20 years are examined for technological developments which could mean significant savings potentials for machines and systems in operation. In this context, only those developments are considered which have a Technology Readiness Level (TRL) of at least five, i.e. which have been tested in operation at least as a demonstrator. This restriction was made in order to evaluate only technologies that could be used in the near future. The development of electromechanical linear and rotary drives is also analyzed in order to be able to consider the potentials of all drive technologies in comparison. The area in which the fields of application of the different technologies investigated overlap will be identified on the basis of a market analysis. For this area, a substitution of fluid technology by electromechanical drives is therefore possible in terms of performance.

The application of the technically possible energy-saving measures in the fluid power sectors which convert large amounts of energy are analyzed in chapter 4. Based on important applications in stationary and mobile hydraulics, pneumatics and compressed air generation, an application-specific analysis is made of whether energy-saving potential can be achieved with improved control strategies, by upgrading the technology or by an electromechanical substitute. The methodology used for this purpose leads to a cross-sectoral point evaluation of the energy saving potentials.

Chapter 5 concludes with an analysis of the barriers which (could) exist today in the implementation of these measures. Past and current funding guidelines and (mega-)trends that have influence on the implementation of efficiency measures are identified.

Fluid technology (hydraulics and compressed air technology including pneumatics) refers to the use of pumped or pressurized gases and fluids to generate, control and regulate forces and movements and is a sub-area of drive technology. Fluid technology is a cross-sectional technology, which is used in particular in industry and manufacturing, but also in almost all areas of public life. Especially the advantages of the simple generation of linear motion, the central energy conversion and the high power density make it possible to use it in a wide variety

of applications from open-cast mining excavators to the dosing of drugs, which all together result in a significant energy input.

Only little information is available on the amount of energy used in fluid-power technology in the balance area of Germany. There are no publications on the energy requirements of fluid power. Publications estimating energy requirements concern the generation of compressed air. A study that provides a rough estimate of compressed air demand in the EU dates from 2001. It is still used as a reference point for the annual German energy demand for compressed air. No such publications are available for hydraulic drive technology.

A US study (Love, 2012) based on empirical surveys carries out energy demand estimates for the United States. The results can neither be validated and checked for plausibility nor transferred to Germany.

Fluid-power technology is applied in many sectors of industry, trade and commerce. The applications can be divided into compressed air (with a subgroup of pneumatics), stationary, mobile and aircraft hydraulics:

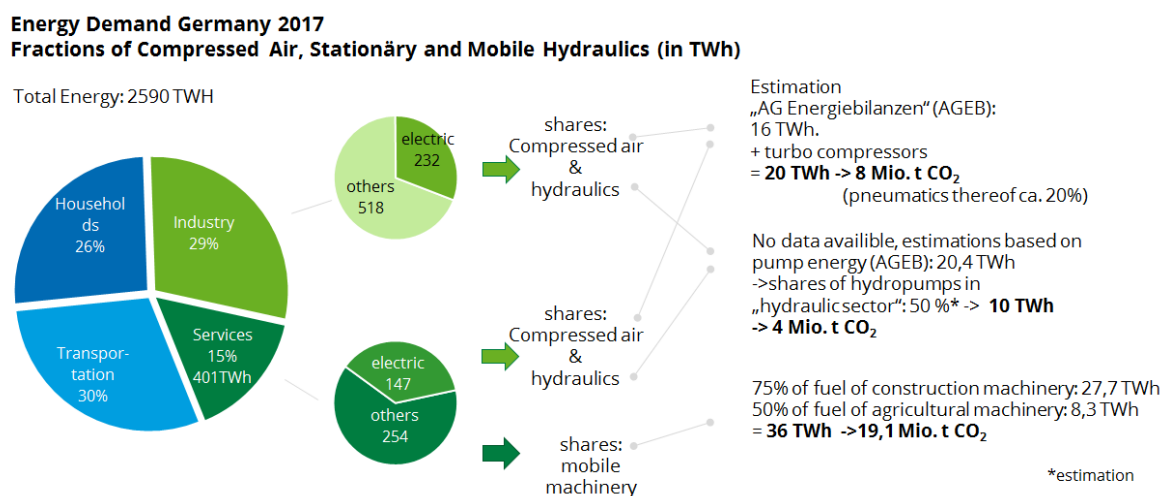
- ▶ Screw- and piston compressors account for about 80% of the energy amount used for compressed air generation. The remaining 20% are turbo-compressors, which have capacities in the megawatt range and are mostly powered by fuels. Diesel-powered compressors, such as those used on construction sites, are neglectable when considering energy use. Approx. 80% of compressed air is used as active air (e.g. for transporting bulk materials), process air (e.g. for cooling, drying or atomising) or test air. Their applications are not examined in this report. Approx. 20% of compressed air is used by drive technology in pneumatic systems, which will be examined in more detail here.
- ▶ Stationary machines and systems that are operated hydraulically are almost exclusively operated from the grid. For this reason, stationary hydraulics, of which presses and plastic injection moulding machines are the best-known representatives, form a separate area of investigation.
- ▶ Mobile hydraulic machines are operator-guided machines which are driven by a diesel engine and are therefore considered separately. The largest amount of mobile hydraulic machines in terms of volume are excavators, wheel loaders and tractors.
- ▶ Hydraulic drives are also widely used in civil and military aviation. In this segment, significantly different boundary conditions (weight, safety, development times, ...) need to be considered when aiming at lower CO₂-emissions. In addition, no data are available for reasons of confidentiality. These applications are not considered in this study.

Approximately €620 billion or 18% of the total turnover of the German economy in 2018 was generated by the construction and manufacturing industries. Fluid power companies account for 4% of this. Fluid-power industry is a supply industry whose importance can also be identified by the turnover of customer industries (companies using hydraulics or pneumatics as technology), which account for 55% of German machinery production. Measured in terms of economic indicators, fluid power is an important sector of Germany's mechanical engineering industry, which can make a significant contribution to reducing CO₂ emissions by increasing energy-efficiency. Particularly high proportions of fluid technology drives can be found in the construction machines and building material machinery, materials handling and agricultural technology, machine tools, and food and packaging machinery sectors. The quantitative

distribution of fluid and drive technology in Germany cannot be determined on the basis of economic data. The quantity of exported and imported products and the lifecycle of components and systems cannot be determined without field studies. Such studies – even on a smaller scale – are not available for Germany. Conclusions on the energy balance of this drive technology cannot be derived from the economic data.

CO₂ emissions are determined for the application areas of compressed air (pneumatics), mobile and stationary hydraulics on the basis of data from the Working Group on Energy Balances (AGEB), publications on the inventory and use of mobile machines, as well as on the basis of own calculations and estimates supported by the expertise of the industrial companies Bosch Rexroth AG (hydraulics), Festo AG (pneumatics), Liebherr (mobile hydraulics), Panolin (hydraulic fluids) and the German Engineering Federation (VDMA).

Figure 1: Fractions of energy demand of fluid-power technology in Germany and CO₂ emissions



source. DESTATIS, AGEB, embodiment IMM

Figure 1 shows the distribution of total energy consumption in Germany in 2017 and the distribution to fluid power. According to the estimates made, the operation of fluid technology systems in Germany releases up to 25 million tons of CO₂ each year, of which about three quarters are caused by the emissions of mobile machinery. The CO₂ emissions for the production of systems and components in the sense of a "CO₂ footprint" are not included in this calculation.

The energy efficiency of the technology is a key to reducing energy demand and thus also CO₂ emissions. The efficiency potentials can be tapped at the level of individual components, subsystems or entire machines and plant networks by means of structural or control-related adjustments. No calculations have yet been made on the level of the available energy saving potentials in components, systems and machines and plants in fluid technology.

Various potential measures for saving energy are presented at the level of components, system architectures, system control or the use of alternative technologies on the basis of basic technical feasibility. The research includes measures which have been realized and validated in at least one prototype.

In the field of pneumatic drive technology, savings potentials were identified in 3 different categories. Replacement and improvement of components offer little potential for energy savings, as the components available on the market have a high degree of technological maturity. Medium potential exists due to changes in the plant topology: the use of energy saving circuits, the introduction of different pressure levels as well as a holistic view from compressor to actuator can save energy. The greatest savings potential is in the dimensioning of the drives. In

particular, a lack of methodical know-how is an obstacle to the energy-efficient design of pneumatic drive systems in practice. The methods researched in the last 10 years have so far received little practical application.

In stationary hydraulic drives, there is potential for savings in the small and medium single-digit range by replacing electric motors and components with newer makes with improved efficiency. In terms of control technology, large energy savings can be achieved by temporarily stopping drives. However, this is highly application-specific and may also depend on other factors such as the temperature control of the machine. The greatest potential can be tapped by updating the machines drive trains. There is great potential in particular in the replacement of valve-controlled systems by displacement-controlled systems and the use of decentralized (displacement-controlled) drive units. When actuators are operated in parallel on central networks, performance savings can be achieved by systematically designing and adapting actuators and pressure levels. The substitution of hydraulic linear drives by electromechanical sliding screw drives (GGT, e.g. trapezoidal screw thread), ball screw drives (KGT) and roller screw drives (RGT) is technically possible today in the range of actuator forces up to 1000 kN. If energy savings of between 10% and 20% could be implemented, a CO₂ saving of 0.4 megatons of CO₂ can be expected – calculated as the CO₂ emissions of a city the size of Ravensburg (50,500 inhabitants, average 2019). The conditions under which the savings can be implemented economically by the companies are too application-specific to be able to give a generally valid answer.

Mobile hydraulic systems from agriculture, forestry and construction have great energy saving potentials by the operators*. Enormous savings can be achieved by the shutdown of machines by operators* or an automatic start-stop system. The use of new hydraulic architectures also offers great potential for savings. The substitution of hydraulic drives by electromechanical ones makes no sense ecologically without replacing the internal combustion engine powered by fossil fuel by a (renewable) source of electrical energy. Electric wheel drives are ready for being implemented from a technical point of view. However an economically sensible implementation needs an (renewable) electrical energy source. For smaller machines the use of electromechanical linear drives is technically possible. By avoiding idling times and using the energetically best possible technology, potentials of 15% to 40% are conceivable, which would correspond to a CO₂ saving of 2.9 to 7.6 million t CO₂ per year – mathematically speaking, a city the size of Cologne as the fourth largest city in Germany.

Today, mainly mineral oil-based pressure fluids are used in hydraulic applications. There is a conflict between maintaining lubricity at higher temperatures and the level of flow losses at high viscosities. The use of fluids with the lowest possible viscosity should be aimed for, but fails because of the users' fear of system failures. Energy savings of 3-5% are possible without additional costs, especially in stationary hydraulic applications where operating and environmental conditions are known.

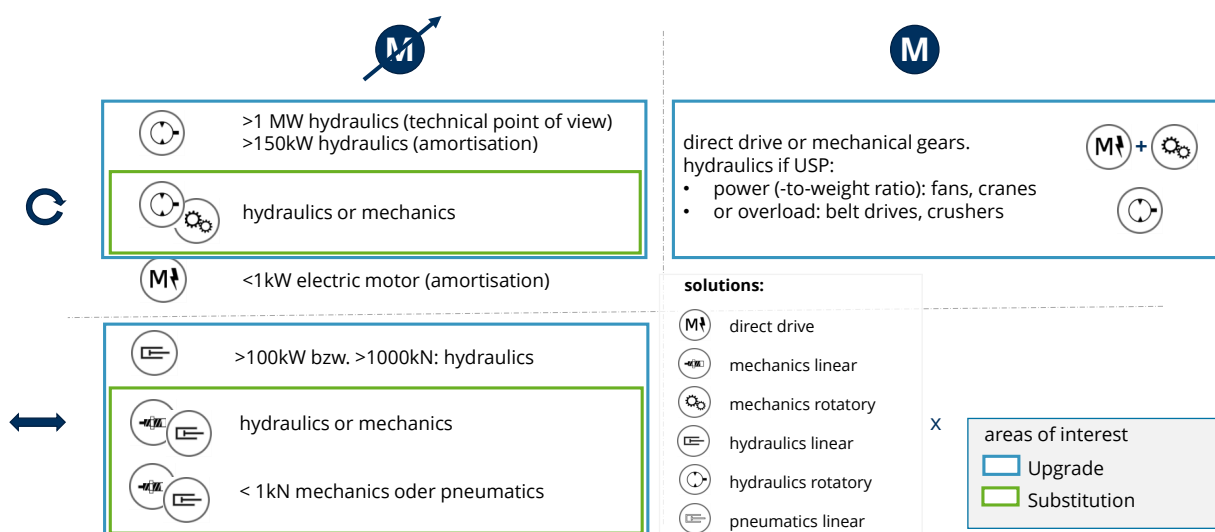
Energy can also sometimes be saved by changing technology. This requires technical equivalence, which is only given in a defined performance range. On the basis of market research, the overlapping areas of force and power density of hydraulics, pneumatics and electromechanical linear and rotary drives are shown.

In principle, the possible substitution range for hydraulic and pneumatic rotary drives can be limited to small masses by the requirement of miniaturization (<0.1 kg) and low power densities (<10 W/kg). As far as high power densities above 1000 W/kg are concerned, practically only hydraulic motors can be considered. Above 10 t net weight, only very small series or one-off productions are relevant, which are optimized specifically for the application.

All in all, the overlapping range of rotary hydraulic, pneumatic and electric drives is manageable. This applies above all to the area of stationary systems, although the periphery and other boundary conditions must be taken into account (supply of the pressure medium, technical requirements e.g. robustness and safety against overload). In mobile machines, a substitution of hydraulic motors is linked to the transition to alternative drive concepts. As long as the central energy supply is mechanical (combustion engine), the use of electric traction drives will probably remain uneconomical. Pneumatic motors can –from a technical point of view- be substituted by electric drives in a wide range. Due to the small number of units and other technological boundary conditions, such as use in potentially explosive environments, the overall substitution potential is low.

Hydraulic cylinder drives are superior to all other linear drives in terms of high power requirements and forces. The technically possible range for the use of electromechanical linear drives can be limited to power <100 kW and forces <1000 kN. Modern electric cylinders occasionally have power and forces above these limits. The running performance of electromechanical linear drives depends on the load, which must be taken into account in the design. Pneumatic cylinder drives lie in a force and power range, which is covered by electromechanical linear drives (e.g. electric cylinders with sliding screw drive (GGT), with ball screw drive (KGT) and roller screw drive (RGT)) as well as linear motors and, in the case of low power unconventional actuators. The substitution of pneumatic linear drives is therefore technically possible in a wide range. Comparisons of forces and performances of different linear drives show the possibilities and limits of the technologies' field of application. An overview of the analysis of the overlapping areas of the performance data is shown in **Figure 2**.

Figure 2: Overlap areas of hydraulic, pneumatic and electromechanical drives by power



source: IMM

Subsequently, the identified investigation areas serve as a basis for application-specific analyses in important applications.

The technologies under consideration, hydraulics, pneumatics and electromechanics, do not currently exhibit any general, disruptive potential in the sense that a technology replacement could be carried out with better performance or significantly lower costs. The use of all technologies in proven industrial solutions confirms this. With regard to the described general energy saving potentials, further technical restrictions apply in each application (in addition to economic efficiency), which can differ significantly depending on the machine. The analysis of the possible savings and their evaluation must therefore be made on an application-specific

basis. On the basis of the investigation of improved control strategies as well as the development of potentials through updates of the components and system architecture and the identified technically possible substitution areas; specific energy-intensive applications are examined for substitution by electromechanical drives. For this purpose, applications are categorized and those with high savings potential are analyzed and evaluated. Indications for quantitatively high savings potential are applications with large installed power, long operating times of individual machines and a large number of units in a machine category.

The saving potentials are compared on the basis of an evaluation methodology according to the expected energy savings after the measures have been implemented. The result is a list, weighted according to savings potential, of measures from the categories control engineering, update and substitution for applications in the fields of compressed air (especially vacuum generation and pneumatics), stationary and mobile hydraulics.

Specific energy saving measures with very high expected energy demand and thus CO₂ savings are from a technical point of view:

- ▶ Supporting users in the selection of energy-efficient systems. A correct design of drives and components could improve 80% of pneumatic systems with savings up to 40%.
- ▶ The conversion of drawing cushions in deep drawing presses from valve to displacement control. This applies to all larger deep drawing presses and offers potential savings of up to 30%. This technology is protected by a patent until 2024; it is currently not used.
- ▶ Avoiding idling in mobile hydraulic systems, especially excavators and wheel loaders. During idle periods, the supply of auxiliary consumers requires approx. 50% of the power in nominal operation. In field tests, downtimes in excavators and wheel loaders account for up to 44% of operating times. The introduction of automatic start-stop systems, as known from the automotive sector, could lead to large savings.
- ▶ The application of condition-based maintenance concepts is conceivable in all components of machines and plants. By extending operating times and avoiding failures, the production of new components and the disposal of old ones can be reduced and the CO₂ balance improved.
- ▶ The substitution of screw drives in injection molding machines, which for cost reasons are generally designed with simple hydraulic motors with low efficiency, by servo direct drives holds great energy potential. In practice, this measure often fails because of the comparatively higher investment costs.
- ▶ Adjusting the viscosity class towards the lowest possible viscosity during operation offers energy saving potentials of 3-5%, which has been proven in long-term tests with injection molding machines. This measure can be implemented in the short term without additional costs.
- ▶ The use of energy-saving circuits in pneumatics holds great potential. In addition, by using expansion energy, up to 65% of the compressed air can be saved in 30% of the circuits compared with standard pneumatics in practice.
- ▶ Hydraulically driven injection moulding machines today can be operated valve- or displacer-controlled. Advances in the field of dynamic response of displacer controls also allow for

high dynamics in displacer-controlled drives – with considerably better system efficiency. A changeover to displacer-controlled machines offers great potential for energy savings.

- ▶ In compressed air systems, avoidable pressure losses often occur. Efficiency can be improved by regular maintenance of the compressed air treatment system and correct dimensioning. Per bar of pressure loss about 8% energy can be saved.
- ▶ Estimations show that 80% of compressed air systems have leakages in the central compressed air network, in which up to 30% of the compressed air is lost. Further losses occur in supply lines, components. Approx. 5% of energy can be saved if leaks in the central network are consistently eliminated. Additional saving potentials result from the elimination of leakages in the components

A detailed economic assessment of the proposed measures cannot be made in a generally valid way due to numerous constraints.

A rough estimate of the medium-term savings potential of the technology on the basis of the applications investigated is an average of 18%, resulting from approx. 15% savings in mobile hydraulics, 20% in stationary hydraulics and 25% in compressed air generation and pneumatic drives. The consistent implementation of the proposed measures could lead to calculated savings of up to 6 million tons of CO₂ per year in Germany, which represents approximately 0.7% of total German CO₂ emissions in 2018.

The proposed technically feasible energy saving potentials are countered by obstacles that prevent their implementation in practice. The latter can be divided into barriers relating to personnel policy and economic barriers. The knowledge and technical understanding of a measure is a prerequisite for an assessment of the existing application-related savings potential. The visualization of energy flows can be an effective means to increase the sensitivity for energy savings. The visualization of an ecological footprint can also have positive effects for the customer. Other factors such as the priority of savings measures, employee motivation or decision-making structures in companies are factors that have a considerable influence on the implementation of savings measures, regardless of technical feasibility.

The main economic obstacle is often the lack of profitability of measures within the specified payback periods. Survey results also suggest that the measures implemented cannot usually be refinanced by energy costs alone, especially if depreciation periods of two to three years are assumed, which are usual in an industrial environment. Subsequently, measures are implemented as "accompanying measures" within the framework of other modernization projects and are thus realized on a broad scale much later.

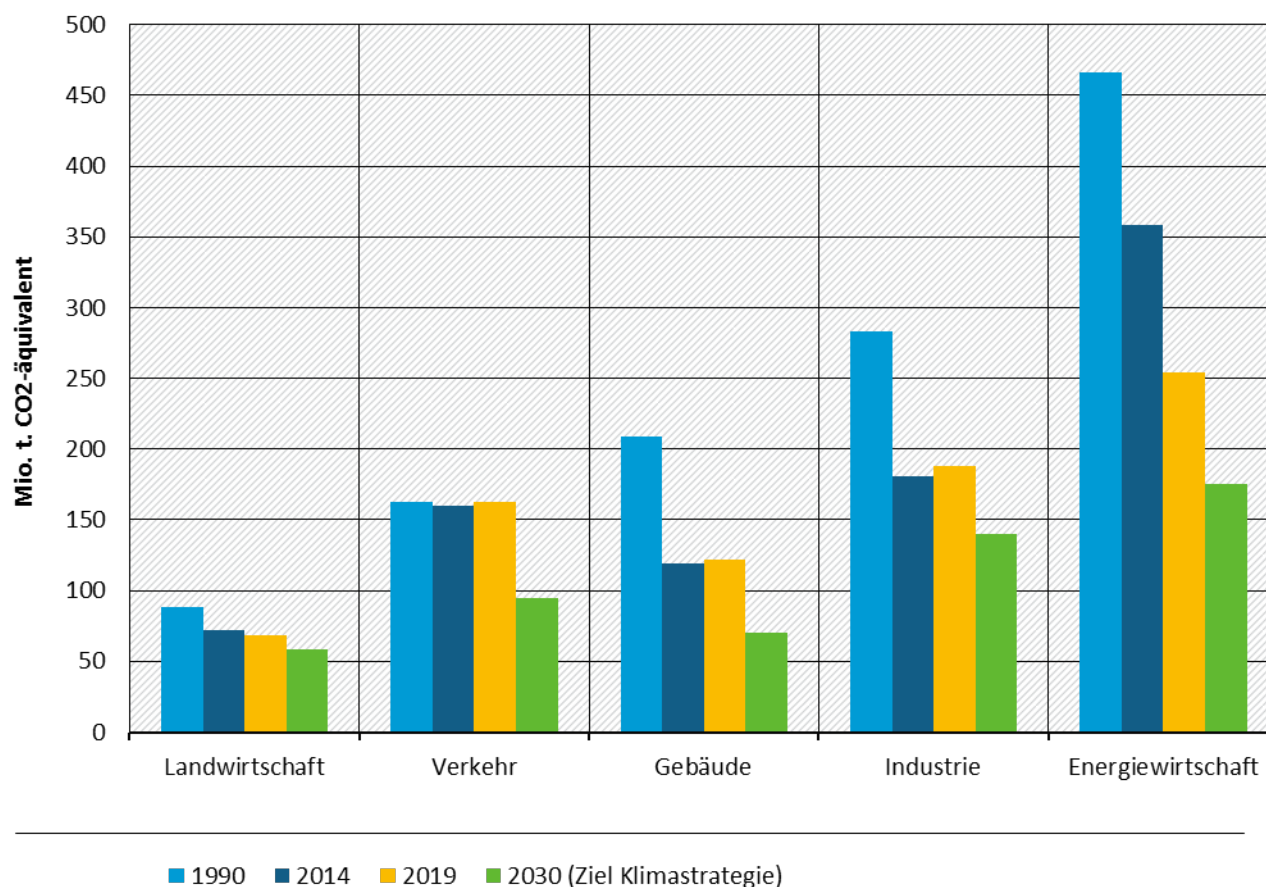
The political framework conditions set to achieve the climate targets are a key factor in the implementation of efficiency measures in companies, along with the growing awareness of climate change. In addition, voluntary commitments by large companies to CO₂-neutral production represent an important point of orientation for smaller companies.

1 Einleitung

Der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen ist ein Ziel der Politik der Bundesrepublik Deutschland. Neben der Reduzierung der Abhängigkeit des Industriestandorts von begrenzt verfügbaren Ressourcen ist dies auch aus Gründen des Klimaschutzes ein wichtiges Ziel. Mit dem Klimaschutzplan 2050 hat sich Deutschland das Ziel gesetzt, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 in den Handlungsfeldern Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Landnutzung und Forstwirtschaft drastisch zu reduzieren um dem Ziel der Transformation zur Treibhausgasneutralität näher zu kommen. Als Vergleichswert dient dabei der Treibhausgas-Ausstoß des Jahres 1990, gemessen in CO₂-Äquivalent [Bmu16]. Bis 2030 sind für die genannten Sektoren Zwischenziele vereinbart. Für den Bereich der Industrie, der beständig einen Anteil von ca. 20% an den Treibhausgasemissionen in Deutschland hat, besteht das Sektorziel darin, den CO₂-Ausstoß von 283 Mio. Tonnen pro Jahr im Jahr 1990 um mindestens 55% zu reduzieren.

Abbildung 3: Ziele Klimaschutzplan 2050

Werte in Millionen Tonnen CO₂ Äquivalent pro Jahr



Quelle: (BMU et al., 2020)

Deutschland selbst ist mit 2,4% des weltweiten CO₂-Ausstosses im globalen Vergleich nach China, USA, Indien, Russland und Japan trotz verhältnismäßig geringer Einwohnerzahl der sechstgrößte Emittent von CO₂ der Welt. Darüber hinaus werden in Deutschland produzierte Maschinen und Anlagen in der ganzen Welt betrieben. Gute Gründe um den Klimaschutz durch die Verbesserung der Energieeffizienz in allen Bereichen voranzutreiben.

Industrieprozesse und das verarbeitende Gewerbe haben einen Anteil von ca. 20% an den Treibhausgasemissionen (BMU et al., 2020). Der Sektor Industrie umfasst dabei alle Emissionen aus Verbrennungsprozessen und der Eigenstromversorgung des verarbeitenden Gewerbes sowie Emissionen aus industriellen Prozessen und der Produktverwendung fluoriertes Gase (direkte Emissionen) (BMU, 2016). Nicht eingerechnet sind dabei die Emissionen für Herstellung und Bezug der Energieträger, wodurch Einsparungen in diesem Sektor in Bezug auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen mehrfach wirksam werden.

Ein wirksames Element zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Minderung des Ressourcen- und Energiebedarfs in der Produktion. Hier setzt die vorliegende Studie an:

In der Antriebstechnik sind fluidtechnische Antriebssysteme weit verbreitet. Sie lassen sich nach der Art des verwendeten Druckmediums unterscheiden. Wird ein flüssiges Energiemedium verwendet, werden sie als hydraulische Antriebe bezeichnet. In hydraulischen Antriebssystemen wandelt eine Pumpe die Energie eines Motors in hydraulische Energie. Es kommen überwiegend Elektro- und Verbrennungsmotoren zum Einsatz.

Wird Luft als Energiemedium eingesetzt, spricht man von **Drucklufttechnik**. Diese lässt sich in Druckluftbereitstellung und Druckluftanwendung/-verwendung unterteilen. Druckluft wird von Verdichtern, auch Kompressoren genannt erzeugt. Als Antriebe kommen überwiegend Elektromotoren zum Einsatz; große Kompressoren mit Leistungen im Megawattbereich werden mit Gas- oder Dampfturbinen angetrieben (Turbokompressoren). Anwendungen der Drucklufttechnik sind in der direkten Luftverwendung (z.B. Prozess- Spül- oder Aktivluft), der pneumatischen Antriebstechnik (**Pneumatik**) und der Vakuumtechnik zu finden.

Die Übertragung von Energie mit flüssigen Medien wird als **Hydraulik** bezeichnet. In der Antriebstechnik werden vorzugsweise Öle oder wasserhaltige Flüssigkeiten zur Energieübertragung eingesetzt. Der Einsatz hydraulischer Antriebe lässt sich in mobilhydraulische und stationärhydraulische Antriebe unterteilen, letztere werden oftmals als Industriehydraulik bezeichnet.

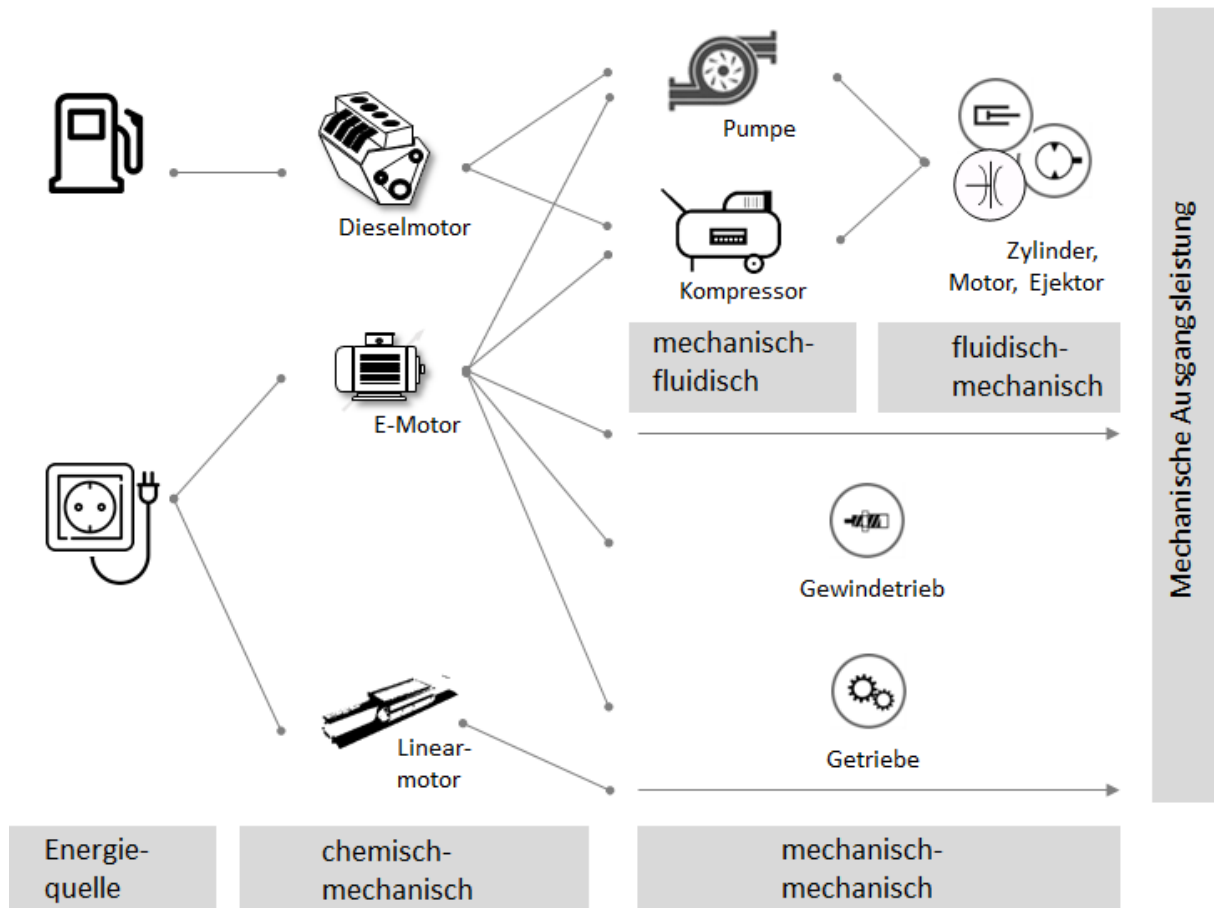
Untersuchungsgegenstand ist die Nutzung der Technologie in Deutschland sowie die Analyse und Bewertung der Einsparpotentiale. Hierfür wird zunächst auf der Basis von Daten aus wirtschaftlichen und energetischen Erhebungen sowie wissenschaftlichen Studien die Höhe des Energieverbrauchs abgeschätzt. Für die einzelnen Teilbereiche der Fluidtechnik werden Energieeffizienzmaßnahmen vorgeschlagen, welche aus Forschungsarbeiten bekannt sind und vom Technologieniveau mindestens als Demonstrator vorliegen, also mit vertretbarem Aufwand und klar abschätzbarem Risiko zur Marktreife gebracht werden können. Die Effizienzmaßnahmen werden gegliedert in regelungs- und steuerungstechnische Maßnahmen, das Update der Technologie auf zeitgemäße Systeme und Architekturen sowie die Substitution fluidischer Antriebe durch elektrische und elektromechanische Antriebssysteme. Eine Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich des Effizienzpotentials, der Skalierungsfähigkeit sowie des Aufwands zur Umsetzung und bzgl. bestehender Hürden zeigt wirtschaftlich zu erschließende Potentiale auf. Vorschläge für Anreize, die zu einer schnelleren Durchdringung der Industrie mit energieeffizienten Lösungen und damit einer zügigeren Reduzierung des Primärenergiebedarfs führen, beschließen die Arbeit.

1.1 Technologiebeschreibung

Die Fluidtechnik ist eine Antriebstechnologie. Ausgehend von der Erzeugung einer in fast allen Fällen rotatorischen Bewegung durch eine Verbrennungsmaschine oder einen Elektromotor wird diese Bewegungsenergie in fluidtechnischen Antrieben umgeformt, gespeichert, in andere Bewegungsarten überführt und am Aktor in definierter Menge und Geschwindigkeit abgegeben. **Abbildung 4** zeigt die Möglichkeiten der Transformation von Elektroenergie oder fossilen

Brennstoffen zu definierter linearer oder rotatorischer Ausgangsleistung mittels mechanischer oder fluidischer Getriebe.

Abbildung 4: Energie- und Leistungstransformation in fluidtechnischen und mechanischen Antrieben



Quelle: eigene Darstellung IMM

Die Umformung erfolgt dabei in der Hydraulik über eine Verdrängereinheit, welche einen definierten Volumenstrom in den Kreislauf fördert. In der Pneumatik erhöht ein Kompressor die Arbeitsfähigkeit der Luft durch Verdichtung.

1.1.1 Drucklufttechnik

Druckluft wird in nahezu allen Industriezweigen eingesetzt, da Luft als Bestandteil der Atmosphäre überall unbegrenzt vorhanden ist. Drucklufttechnik wird aufgrund ihrer universellen Einsetzbarkeit in zahlreichen Branchen eingesetzt. Mit Druckluft lässt sich Energie einfach speichern, sie kann hohe Leistungen übertragen, auch wenn bedingt durch den eingeschränkten Druckbereich die Leistungsdichte deutlich niedriger ist als in der Hydraulik.

Anwendungsmöglichkeiten der Drucklufttechnik umfassen:

Transport: Automatisches Ein-, Auslagern und Umlenken von Werkstücken; Beförderung von Schüttgut und Flüssigkeiten durch Rohre, Rohrpost,

Bewegen: schlagende Druckluftmaschinen und -werkzeuge, Vibratoren und Rüttler,

Spritzen: Auftragen oder Zerstäuben, Oberflächenbehandlung (Sand-, Kies-, Kugelstrahlen), Lackieren mit Sprühpistolen, Lichtbogenspritzen von flüssigen Metallen, Vernebeln von Flüssigkeiten,

Prüf- und Kontrollverfahren: Feststellung von Abständen, Gewichten und Formveränderungen, Zählung von Gegenständen, Überprüfung von Positionierungen, Sortierung,

Kontrolleinrichtungen: Steuern von Ventilen, Schiebern und Klappen,

Pneumatische Antriebstechnik: Steuern und Bewegen, fixieren und positionieren.

Spezifische Vorteile bei der Nutzung der Drucklufttechnik sind:

- ▶ Unbedenklichkeit des Arbeitsmediums,
- ▶ einfache Energiewandlung aus Druckluft in andere Energieformen (z.B. kinetische Energie, Kälte, usw.),
- ▶ Einsatz in explosionsgeschützten Bereichen möglich und
- ▶ geringe Investitionskosten.

Die im Überdruck gespeicherte Arbeitsfähigkeit der Druckluft wird in der Regel in einem zentralen Netz bereitgestellt. Druckluft ist eine Querschnittstechnologie, die branchenübergreifend in zahlreichen Anwendungen eingesetzt wird. Die Anwendungen lassen sich unterteilen in:

- ▶ Prüfluft zur Prüfung und Kalibrierung von Messgeräten, für Tests von Maschinen und Anlagen,
- ▶ Vakuumlufte die bei der Erzeugung von Unterdruck gefördert wird,
- ▶ Prozessluft in Prozessen zur Trocknung, Zerstäubung u.v.m.,
- ▶ Aktivluft für Förderung, Trennung oder Transport von Gütern sowie
- ▶ Arbeitsluft zum Steuern und Antreiben von Maschinen, Anlagen und Werkzeugen.

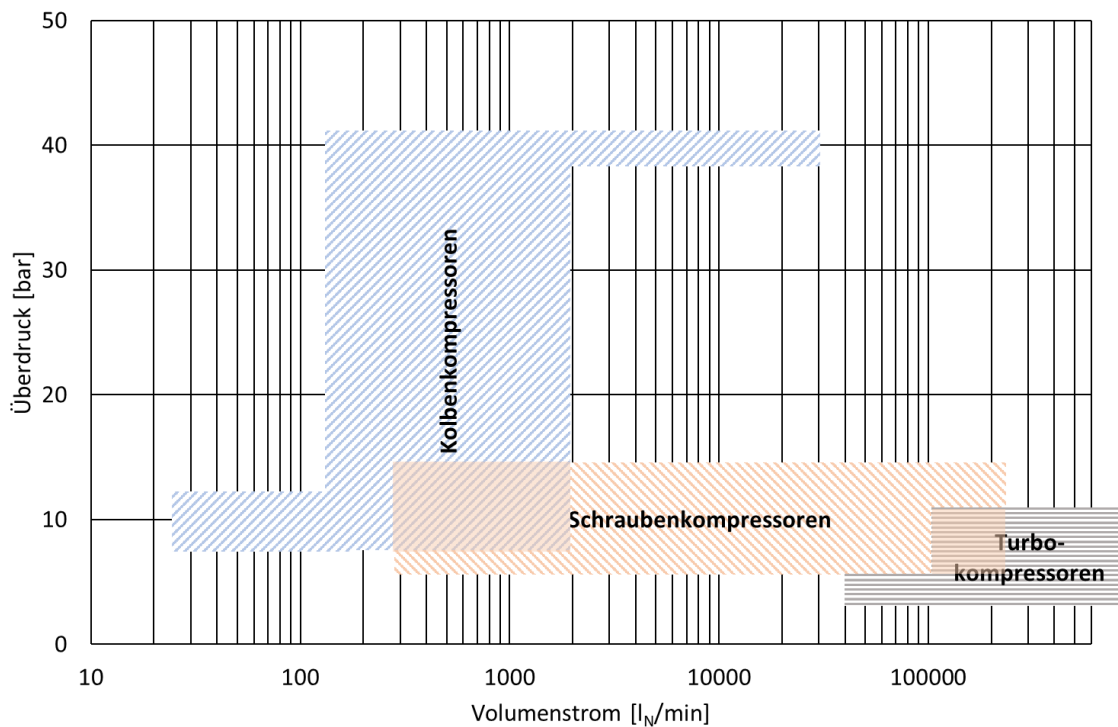
Die Druckluftbereitstellung erfolgt durch die Verdichtung von Umgebungsluft mit Kompressoren. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Verdichterprinzipien zur Bereitstellung von Druckluft, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile besitzen. In der Industrie werden vorrangig Kolben-, Schrauben- und Turbokompressoren eingesetzt. **Abbildung 5** zeigt die typischen Arbeitsbereiche dieser Druckluftkompressorbauarten.

Kolbenkompressoren sind vor allem im kleinen Leistungsbereich bis 15 kW erhältlich. Schraubenkompressoren sind in der Industrie stark verbreitet und werden bei eher geringen Betriebsdrücken (bis 15 bar_ü) und mittleren bis großen Luftbedarfen eingesetzt. Durch den Einsatz einer Drehzahlregelung des Motors, sind Schraubenkompressoren auch für schwankende Luftbedarfe geeignet. Schraubenkompressoren sind das dominierende Verdichtungsprinzip in Deutschland und sind üblicherweise in einer breiten Leistungsklasse von 2 bis 300 kW erhältlich. Bei sehr hohen Luftbedarfen mit niedrigen Drücken werden Turbokompressoren eingesetzt, die Leistungen im Megawattbereich aufweisen.

Im Regelfall werden Kompressoren durch Elektromotoren angetrieben, der Anteil an mobilen Kompressoren für den Baustelleneinsatz ist für den Gesamtenergiebedarf der

Druckluftbereitstellung in Deutschland vernachlässigbar. Turbokompressoren im Leistungsbereich über 1 MW werden teilweise mit Gas- oder Dampfturbinen angetrieben.

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Arbeitsbereiche von Druckluftkompressoren



Quelle: Eigene Darstellung IER

Die Möglichkeiten zur Druckluftherzeugung in der Industrie haben sich dabei unter dem Aspekt der Energieeffizienz in den letzten Jahren deutlich gewandelt: Moderne pneumatische Anlagen verfügen über drehzahlregelte Kompressorstationen mit Wärmerückgewinnung, bei denen deutlich weniger Energie verloren geht. Die Installation dieser energieeffizienten Kompressoren wird durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Programm „Förderung von Energieeffizienz und Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien in der Wirtschaft (EEW)“ (N, 2020a) bezuschusst und damit beschleunigt.

Der Bereich der Arbeitsluft wird als **Pneumatik** bezeichnet und in diesem Bericht näher betrachtet. Pneumatische Antriebe wandeln Druckluft mittels eines Aktors in eine mechanische Bewegung. Ein großes Anwendungsfeld pneumatischer Antriebe ist die Handhabungstechnik, wo einfache Bewegungen tausendfach ausgeführt werden müssen. Schätzungen gehen davon aus, dass ca. 20% der Druckluft als Arbeitsluft verwendet werden (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a). Insbesondere diesem Anteil widmet sich die Analyse der Einsparpotentiale in dieser Studie.

Die Vorteile der Hydraulik bezüglich der Freiheiten in der Anordnung, der einfachen Erzeugung linearer Bewegungen, der zentralen Versorgung, der variablen Übersetzung, Robustheit und Überlastschutz gelten auch für die Pneumatik. Pneumatische Antriebe verfügen über vergleichsweise geringe bewegte Massen und die Möglichkeit leistungsloser Einsparungen. Große Anwendungsfelder neben den Linearaktoren sind Schwenkantriebe und Vakuum-Ejektoren.

Durch die vergleichsweise geringen Abmessungen, die einfache zentrale Energieversorgung und das einfache Handling, die große erreichbare Dynamik sowie die einfache Realisierung von Spannfunktionen werden pneumatische Antriebe in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Die

überwiegende Zahl (>90%) pneumatischer Antriebe ist heute im Bereich der Linearantriebe mit weniger als 200 mm Hub und Durchmessern unter 40 mm zu finden.

Um die Energieeffizienz berechnen zu können, muss bei der Betrachtung der pneumatischen Antriebe auch der Energieaufwand für die Erzeugung der Druckluft (Kompression, Kühlung, Trocknung) betrachtet werden, der überwiegend mit elektromotorischen Kompressoren erfolgt. Die Mehrzahl der pneumatischen Antriebssysteme wird mit diesen Kompressoren betrieben.

1.1.2 Hydraulik

Die Hydraulik ist eine Getriebetechnologie bei der die Energie durch unter Druck stehendes Fluid, in der Regel (Bio-)öle oder Wasser übertragen wird (Gebhardt & Weber, 2020a). Wesentliche Eigenschaften hydraulischer Antriebe sind die einfache Erzeugung großer und stufenlos verstellbarer Kräfte und Momente, eine große Leistungsdichte, die Robustheit und Überlastfähigkeit der Komponenten. Die Übertragung der Leistung erfolgt mittels eines Druckfluids. In vielen Anwendungen kommen Mineralöle auf fossiler Basis oder Biobasis aufgrund der geringen Kosten und der guten Schmiereigenschaften zum Einsatz; auch Klarwasser oder Wasser-Emulsionen finden in vielen Bereichen Anwendung. Der Einsatz druckfester Komponenten ermöglicht – vergleichbar mit der Spannungsisolierung elektrischer Leitungen – die sichere Übertragung großer Leistungen. Standardmäßig werden Drücke zwischen 50 bis 350 bar genutzt. Aber auch Anwendungen bis 600 bar oder vereinzelt mit mehreren tausend Bar Überdruck werden in den letzten Jahren in der industriellen Anwendung vermehrt eingesetzt. Die zur Übertragung großer Leistungen genutzte Technologie kann für die Erschließung von Energieeffizienzpotentialen durch die große Menge der umgesetzten Energie ein wichtiger Baustein sein.

Fluidtechnische Antriebe weisen eine große Vielfalt auf, weshalb die exakte Zuordnung zu Industriebranchen oder Antriebslösungen nicht möglich ist. **Tabelle 1** listet wirtschaftlich wichtige Einsatzbereiche hydraulischer Antriebstechnik auf.

Tabelle 1: Einsatzbereiche hydraulischer Antriebe nach Wirtschaftssektoren

Einordnung gemäß Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP2009)

Industriezweig	Industriezweig (Fortsetzung)
Bergbau	Baugewerbe
holzverarbeitende Industrie	Energiewirtschaft
Hüttenwesen und Gießereien	Gesundheitswesen
Kunststoffindustrie	Handwerksbetriebe
Nahrungs- und Genussmittelindustrie	Land- und Forstwirtschaft
Papierverarbeitende Industrie	Umwelttechnik
Textilindustrie	Verkehrswesen

Mengenmäßig viele Antriebe werden in Pressen, Werkzeug- und Kunststoffmaschinen, Land- und Baumaschinen, in Kraftfahrzeugen sowie im Schiffbau eingesetzt.

Hydraulische Antriebe lassen sich in verschiedenen Architekturvarianten ausführen. Die Bereitstellung der Energie in einem zentralen Drucknetz wird durch dezentral versorgte oder autarke hydraulische Achsen erweitert. Nach dem deutlichen Preisverfall der Leistungselektronik nach der Jahrtausendwende erfolgte eine verstärkte Entwicklung günstiger drehzahlvariabler Antriebe, die in der Hydraulik die Variation des Förderstroms bis zur

Stillsetzung der Antriebe kostengünstig und dynamisch ermöglichen. So wird nur noch so viel Fluid in den Kreislauf gepumpt, wie für die Erzeugung der Aktorbewegung notwendig ist. In der industriellen Praxis können durch diesen Architekturwandel große Wirkungsgradsteigerungen erreicht werden.

1.1.3 Elektromechanik

Elektromotoren nutzen überwiegend den physikalischen Effekt der Lorentzkraft oder der Reluktanzkraft zur Kraft- bzw. Drehmomenterzeugung. Kraft bzw. Drehmoment können direkt (elektrischer Direktantrieb) oder über ein mechanisches Getriebe (elektromechanischer Antrieb) auf den Abtrieb übertragen werden. Die Elektromechanik erlaubt dabei eine Leistungsanpassung, also die Wandlung von Drehmoment und Drehzahl respektive Kraft und Geschwindigkeit, in einem weiten Bereich. Elektrische Antriebssysteme nutzen Elektroenergie, die in praktisch allen stationären und einigen Mobilanwendungen (bspw. Großgeräte im Tagebau) zur Verfügung steht, direkt. Weitere hydraulische oder pneumatische Wandler und Übertragungstrecken können entfallen. Allerdings ist die Leistungsdichte elektromechanischer Antriebssysteme begrenzt. Dies ist auf die maximal über Gleit- bzw. Wälzkontakte übertragbare spezifische Leistung zurückzuführen, welche sich aus werkstoffseitigen bzw. fertigungsbedingten Limitierungen ergibt. Ferner ist die kurzzeitige Überlastbarkeit mechanischer Getriebe geringer als die von hydraulischen und pneumatischen Antrieben.

Zwar ist die Leistungsdichte elektrischer Direktantriebe – bedingt durch das Fehlen eines Getriebes – höher als bei elektromechanischen Antrieben, allerdings schränkt die fehlende Leistungsanpassung deren Einsatz bzgl. der einstellbaren Arbeitspunkte ein. Zudem ist die maximale Leistung elektrischer Direktantriebe in Folge der hohen erforderlichen Motorströme technisch begrenzt.

Der alternative Einsatz elektrischer/ elektromechanischer, hydraulischer, und pneumatischer Antriebe ist in vielen Anwendungen grundsätzlich technisch möglich. In der Praxis entscheiden diverse Randbedingungen über die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Antriebssystems. Elektrische und elektromechanische Antriebssysteme zeichnen sich – insbesondere im geregelten Betrieb – durch eine hohe Steifigkeit und Positionier- bzw. Bewegungsgenauigkeit aus¹. Sie erreichen dabei hohe Gesamtwirkungsgrade und bieten z. T. die Möglichkeit der Rekuperation. Demgegenüber stehen Aufwand und Kosten für Leistungselektronik und Leistungsversorgung. Eine Steigerung der Leistungsdichte sowie Energieeffizienz bei den in der Industrie verbreiteten Motoren (v. A. Synchron- und Asynchronmotoren) ist zu beobachten. Technologiesprünge sind jedoch im Moment nicht absehbar. Der auf die Antriebskomponenten und Antriebssysteme bezogene, vor und nach dem Gebrauch entstehende, Ressourcen- und Energiebedarf (Herstellung, Recycling / Entsorgung) muss gesondert betrachtet werden und ist nicht Inhalt dieser Studie.

1.1.4 Kriterien zur Technologieauswahl

Die Auswahl einer geeigneten Getriebetechnologie erfolgt nach der zur Verfügung stehenden Energiequelle und der Energieform am Aktor. Für mobile Maschinen ist dies heute in der Regel ein Verbrennungsmotor, auch wenn andere Energieformen wie Batteriespeicher oder Brennstoffzellen in Zukunft größer werdende Anteile stellen könnten (Bögel & Lindner, 2019;

¹ Fluidtechnische Antriebe können ebenfalls positionsgeregelt betrieben werden. Dies ist aber bei hohen Genauigkeitsanforderungen mit größerem Aufwand (z.B. Integration zusätzlicher Sensorik, Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in der Regelung) verbunden. Aktuelle elektromechanische Antriebe verfügen häufig über integrierte Drehgeber bzw. es kommen zunehmend sensorlose Verfahren zur Positionsregelung zum Einsatz, so dass die Möglichkeit zur Realisierung einer Positionsregelung oftmals inhärent gegeben ist.

Herlitzius et al., 2012). Wesentliche Kriterien für den Einsatz von mechanischen oder hydraulischen Getrieben oder den Einsatz von elektrischen Direktantrieben sind die benötigte Leistung, der zur Verfügung stehenden Bauraum sowie die Verluste bei der Wandlung sowie der Übertragung von der Energiequelle zum Aktor.

Im stationären Maschinenbau wird in der Regel ein Elektromotor genutzt, der die Elektroenergie in Bewegungsenergie wandelt. Mechanische, hydraulische und pneumatische Antriebe haben dabei eine große Überschneidung in ihren Anwendungsbereichen aber auch ihre jeweils technologiespezifischen Vorteile, durch die sich über viele Jahre Einsatzbereiche etabliert haben. Diese verändern sich durch Erforschung und Entwicklung der Technologien stetig. Neben einer Einteilung in lineare und rotatorische Aktoren lassen sich kontinuierliche und diskontinuierliche Bewegungen unterscheiden. **Abbildung 6** zeigt eine Systematisierung und Klassifizierung der Lösung von Bewegungsaufgaben. Innerhalb der Bereiche konkurrieren die Technologien mit sich selbst und auch untereinander. Der Wettbewerb der Technologien untereinander findet dabei verstärkt in bestimmten Leistungsbereichen statt, die zunächst durch Marktrecherchen identifiziert werden.

Abbildung 6: Klassifizierung von Bewegungsaufgaben



Quelle: eigene Darstellung IMM

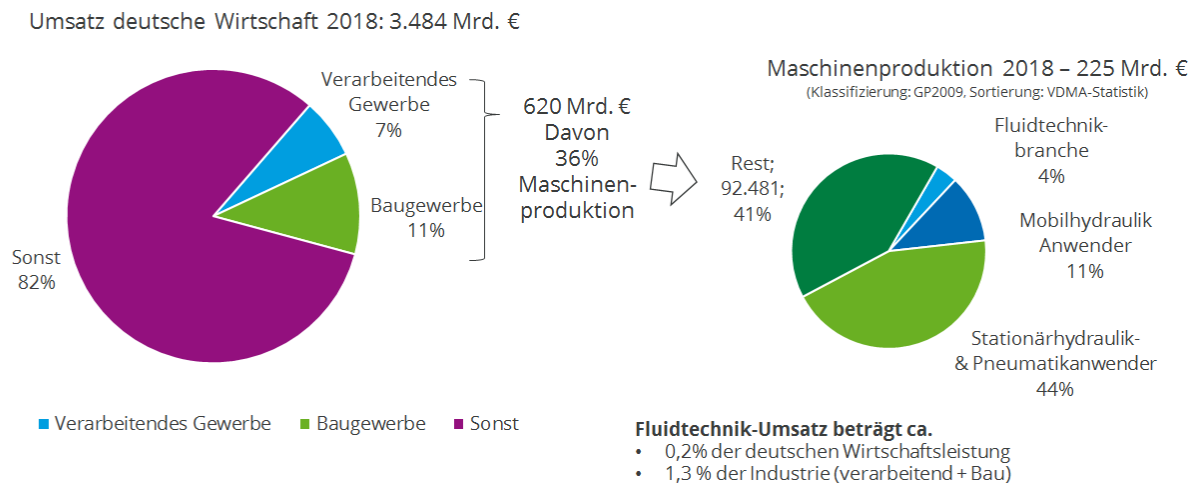
Die Energieeffizienz technisch verfügbarer Lösungsmöglichkeiten kann auf Basis dieser Systematisierung miteinander verglichen werden. Das Vorhandensein von energieeffizienten technologisch möglichen Alternativen kann Ausgangspunkt für die weitere ökonomische Bewertung sein.

Welche technologischen Lösungen in der Praxis gewählt werden, hängt neben den technischen von vielen weiteren, meist wirtschaftlich bewertbaren Faktoren ab, die so vielfältig sind wie die Anwendungen selbst. Eine ökonomische Bewertung kann daher im Rahmen dieser Arbeit nicht verallgemeinert vorgenommen werden.

1.2 Wirtschaftliche Einordnung des Fachgebiets

Die Fluidtechnik ist eine Querschnittstechnologie, die in verschiedenen Branchen des verarbeitenden und des Baugewerbes angewandt wird. Die Branchen, in denen fluidtechnische Antriebe zum Einsatz kommen machten im Jahr 2018 knapp 18% des gesamten Umsatzes der deutschen Wirtschaft (inkl. Export) aus, was einen Anteil von ca. 60% der deutschen Maschinenproduktion umfasst (**Abbildung 7**).

Abbildung 7: Anteil der Fluidtechnik am Umsatz der deutschen Wirtschaft



Quelle: DESTATIS nach Klassifikation der Wirtschaftszweige WZ2008, eigene Darstellung IMM

Branchen, die hydraulische und pneumatische Komponenten einsetzen, sind in **Tabelle 2** gemäß der Klassifizierung der Güterproduktionsstatistik aufgelistet. Der Umsatz der Fluidtechnik-Hersteller allein betrug 2018 ca. 0,2% der deutschen Wirtschaftsleistung.

Tabelle 2: Maschinenproduktion in 2018 – „Fluidtechnik-Branchen“

Absatzbranchen nach GP2009, Branchenaufteilung nach VDMA

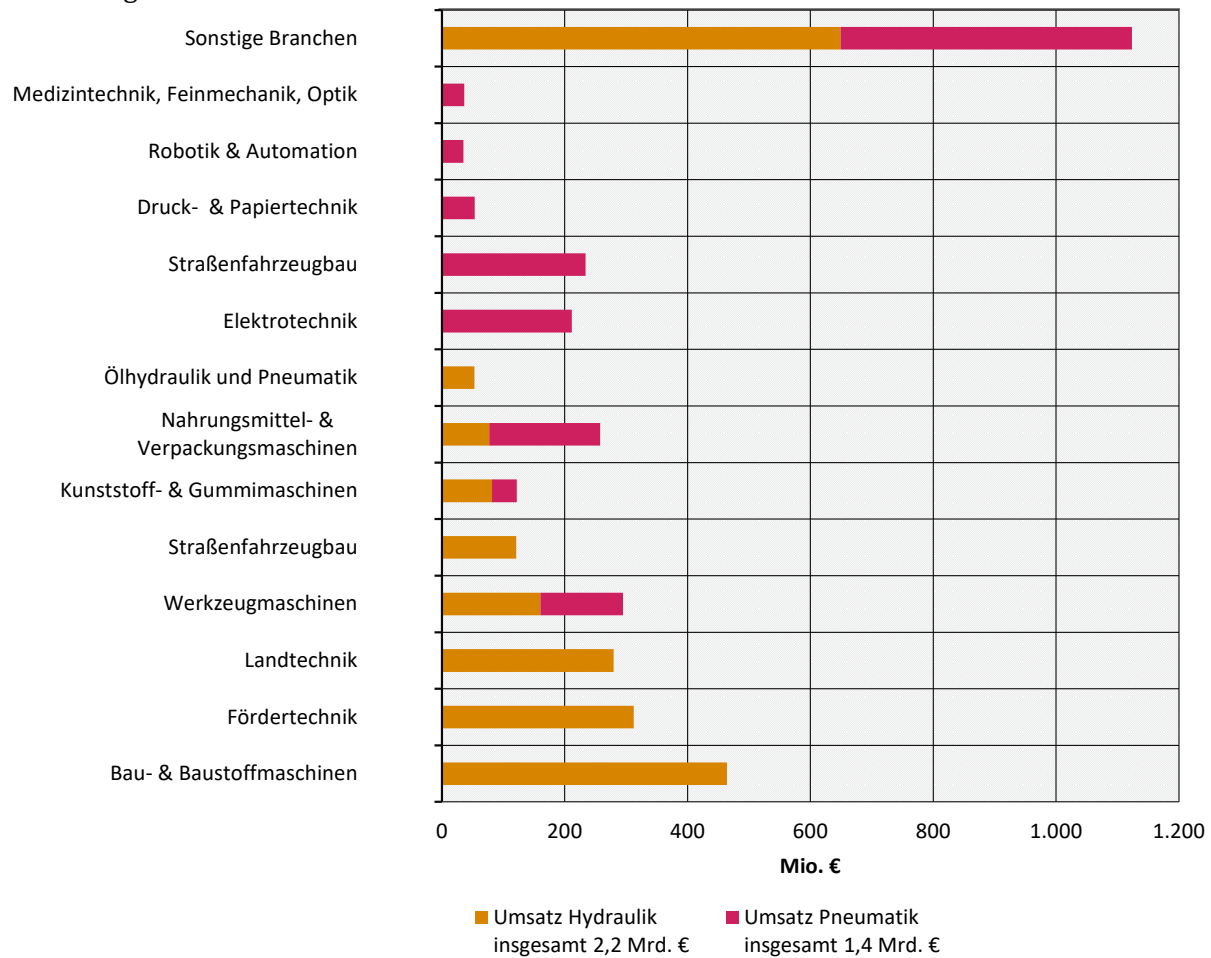
Absatzbranchen Fluidtechnik (Umsatzanteil Gesamtwirtschaft D 2018)	Absatzbranchen mit kleinerem Fluidtechnik-Anteil
Stationärhydraulik und Pneumatik (8 %)	300 Industrieöfen
100 Werkzeugmaschinen	400 Gießereimaschinen
200 Hütten- und Walzwerke	500 Mess- und Prüftechnik
600 Holzbearbeitung	700 Präzisionswerkzeuge
1000 Power Systems	800 Schweißtechnik
1400 Kunststoff- und Gummimaschinen	900 Allgemeine Lufttechnik
1800 Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen	1100 Flüssigkeitspumpen
2200 Fördertechnik	1900 Verfahrenstechnische Maschinen
2300 Druck- und Papiertechnik	2000 Geldschränke, Tresore
2500 Textilmaschinen	2600 Bekleidungs- und Ledertechnik
3300 Aufzüge, Fahrtreppen	2900 Feuerwehrtechnik

Absatzbranchen Fluidtechnik (Umsatzanteil Gesamtwirtschaft D 2018)	Absatzbranchen mit kleinerem Fluidtechnik-Anteil
3800 Halbleiter und Flachdisplay- Produktionsmittel	3000 Reinigungssysteme
3900 Sonstige Maschinenbauerzeugnisse	3100 Armaturen
Mobilhydraulik (2 %)	3400 Antriebstechnik
1300 Bau- und Baustoffmaschinen	3500 Motoren und Systeme
1500 Bergbaumaschinen	3700 Montage, Handhabung, Industrieroboter
1600 Landtechnik	
Fluidtechnik-Hersteller (0,8 %)	
3600 Fluidtechnik (Pumpen & Motoren, Ventile, Zylinder, Rep.)	

Die Verbreitung und auch der Umsatz fluidtechnischer Antriebe in den Abnehmerbranchen sind sehr verschieden. **Abbildung 8** zeigt eine Übersicht der wichtigsten Abnehmerbranchen hydraulischer Antriebstechnik in Deutschland. Die Daten des Branchenverbands VDMA Fluidtechnik zeigen (215 Firmen mit einer Marktabdeckung von ca. 85% des Branchenumsatzes) die Umsatzverteilung des deutschen Fluidtechnik-Markts, aufgeschlüsselt nach Hydraulik und Pneumatik. Der Umsatz der Fluidtechnikunternehmen in Deutschland selbst betrug in Deutschland 2017 3,6 Mrd. Euro, wovon 2,2 Mrd. Euro auf die Hydraulik entfielen und 1,4 Mrd. Euro auf die Pneumatik. Insbesondere mobile Anwendungen (Landtechnik, Bau- und Baustoffmaschinen) sowie Druck- und Papiertechnik, Kunststoff- und Gummimaschinen, Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen, Werkzeugmaschinen und Fördertechnik sind wichtige Absatzbranchen für die Fluidtechnik-Industrie in Deutschland. Im gleichen Zeitraum betrug der Umsatz der deutschen Antriebstechnik-Hersteller (inklusive Motoren, Getriebe und Lager, ohne Automotive und E-ANT) in Deutschland laut dem VDMA-Fachverband Antriebstechnik ca. 1,9 Mrd. Euro (210 Firmen mit einer Marktabdeckung von ca. 80%).

Abbildung 8: Umsatz der Fluidtechnik-Unternehmen in Deutschland 2017

Einteilung nach Zielbranche



Quelle: Daten: VDMA, Darstellung: IMM

Die Fluidtechnik ist also eine, an den wirtschaftlichen Kennzahlen gemessen, wichtige Branche des deutschen Maschinenbaus, die durch Effizienzverbesserungen deutlich zur Reduktion des CO₂-Ausstosses beitragen kann. Die wert- oder mengenmäßige Verbreitung von Fluid- und Antriebstechnik in Deutschland lässt sich anhand der Wirtschaftsdaten nicht bestimmen. Die Menge der exportierten sowie der importierten Produkte sowie die Nutzungszeit der Komponenten und Anlagen kann ohne Feldstudien nicht ermittelt werden. Solche Studien liegen – auch in kleinerem Umfang – für Deutschland nicht vor. Schlussfolgerungen zur energetischen Bilanz dieser Antriebstechnologie lassen sich aus den Wirtschaftsdaten nicht ableiten.

1.3 Energetische Einordnung des Fachgebiets

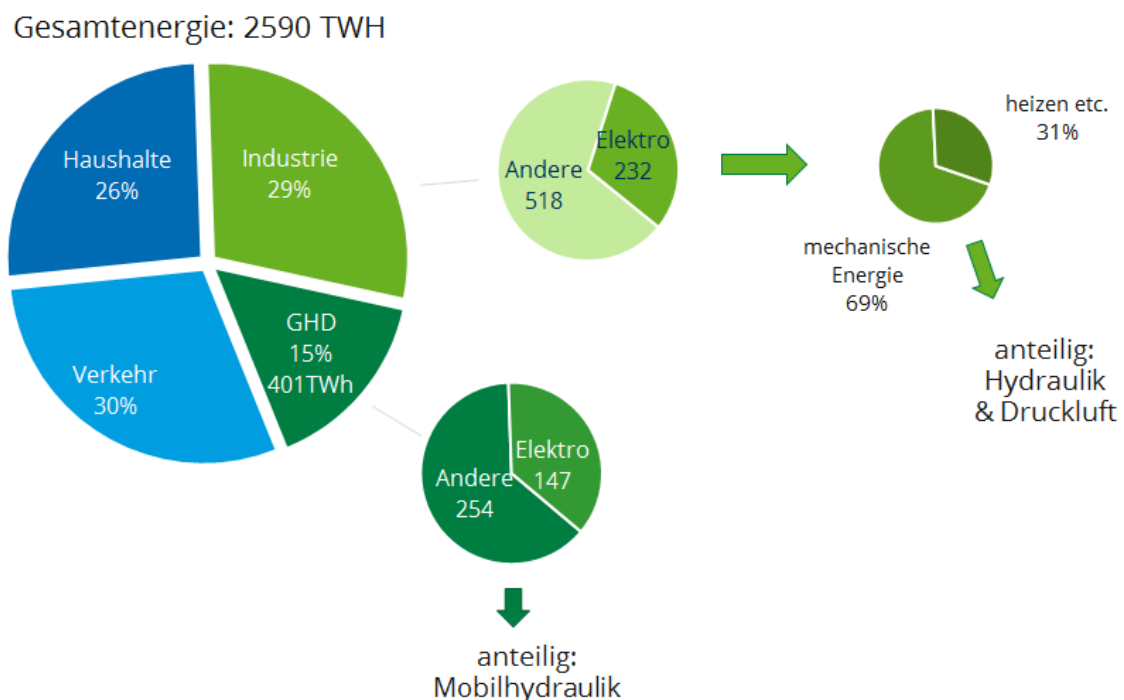
Wirtschaftliche Kennzahlen der Fluidtechnik-Branche geben einen Einblick über Wert und/oder Menge der produzierten Güter. Wie hoch der absolute Energiebedarf der Produkte im Betrieb ist, lässt sich anhand dieser Daten nicht ableiten.

Für die Bestimmung des Energieumsatzes sind mengenmäßige Daten zum Maschinenbestand, der aufgenommenen Energie während der Betriebsdauer, sowie der verrichteten Arbeit notwendig. Für den deutschen und den europäischen Raum liegen keine Daten für den Bestand, die Nutzungsdauer sowie den Energiebedarf fluidtechnischer Antriebe vor. Eine Berechnung der CO₂-Emissionen ist somit nicht möglich.

Möglich ist eine indirekte Abschätzung der Energieaufnahme fluidtechnischer Antriebe durch Veröffentlichungen aus den Teilbereichen der mobilen Maschinen, dem Energiebedarf von Elektromotoren oder der Kompressorentchnik.

Fluidtechnische Antriebe kommen hauptsächlich im industriellen Sektor sowie in Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) zum Einsatz (**Abbildung 9**). Ihre energetische Bedeutung in den Sektoren Verkehr und Haushalt sind von untergeordneter Bedeutung. Der Anteil (mit Elektromotoren erzeugter) mechanischer Energie in den Bereichen Industrie und GHD, der nicht für Wärme- oder Kälteerzeugung genutzt wird beträgt ca. 200 TWh. Der Energiebedarf von Druckluftkompressoren und Hydraulikpumpen ist ein Anteil dieser Energiemenge.

Abbildung 9: Anteiliger Energiebedarf von Hydraulik und Druckluft am deutschen Gesamtenergiebedarf 2017



Quelle: AGEb (AGEb, 2018), Darstellung: IMM

Der Energiebedarf für Druckluft wird von der AGEb mit ca. 7% der industriell benötigten Elektroenergie (16 TWh) abgeschätzt. Pumpen aller Art haben mit 26 TWh laut dieser Schätzung einen Anteil von ca. 11% am industriellen Energiebedarf.

Mobile Maschinen, in denen große Energiemengen für Fahr- und Arbeitsantriebe hydraulisch ausgeführt sind, verbrauchen in Deutschland im Jahr ca. 44 TWh Kraftstoff.

Die Größenordnung des Energiebedarfs von Maschinen und Anlagen, die mit fluidtechnischen Systemen betrieben werden liegt im Jahr im höheren zweistelligen TWh-Bereich, was in etwa mit dem der Netto-Jahresenergieertrag aller deutschen Kernkraftwerke 2019 (75 TWh oder ca. 10% der deutschen Elektroenergiemenge) verglichen werden kann.

Aufgeteilt auf verschiedene Branchen werden im Folgenden Abschätzungen aus Verbrauchsdaten abgeleitet, die eine Eingrenzung des Energiebedarfs der Maschinen und Anlagen ermöglichen. Ausgehend von den in den vergangenen Jahren verkauften Architekturen sowie aktuellen Entwicklungen lassen sich anwendungsspezifisch Effizienzverbesserungen ableiten, auf deren Basis grobe Schätzungen möglicher Energie- und CO₂-Einsparungen durchgeführt werden können.

1.4 Möglichkeiten und Grenzen der Analyse

Grundlage dieser Arbeit sind Studium und Analyse von Fachveröffentlichungen im Bereich der fluidtechnischen Antriebe. Das Institut für mechatronischen Maschinenbau der TU Dresden sowie der Lehrstuhl für Effiziente Energienutzung der Universität Stuttgart verfügen über langjährige Erfahrungen in den analysierten Domänen. Verschiedene Unternehmen wirkten beratend und mittels Datenspenden, insbesondere zur Marktsituation, mit (Fachgebiete in Klammern). Diese sind:

Bosch Rexroth AG (Hydraulik), Festo AG (Pneumatik), Liebherr (Mobilhydraulik), Panolin (Druckflüssigkeiten).

Darüber hinaus wirkte der Fachverband Fluidtechnik im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenhersteller (VDMA) durch Datenspenden und das Bereitstellen digitaler Infrastrukturen mit.

Durch das Einbeziehen wirtschaftlich wichtiger Akteure vermag die Studie eine genaue Beschreibung der wirtschaftlichen Situation und der aktuellen Herausforderungen der Branchen sowie eine profunde Bewertung von Hemmnissen und möglicher Maßnahmen sowie deren Akzeptanz zu leisten.

Schwachstelle ist die mangelnde Verfügbarkeit von Daten, welche die aktuelle Situation beschreiben. Aktuelle Abschätzungen im Bereich der Drucklufttechnik stellen eine Fortschreibung von Schätzungen von vor der Jahrtausendwende dar die nur auf wenigen EU-weiten Messungen basieren. Für die Hydraulik sind weder Schätzungen noch Messungen von Energiedaten verfügbar. Erfassungen zur Menge der im Feld befindlichen Anlagen, deren Standzeiten oder Betriebsdauern sind nicht veröffentlicht, wären aber für eine Ermittlung von effizienten Maßnahmen zwingend erforderlich.

Das Ergebnis der Studie kann also eine Einordnung wahrscheinlich verfügbarer sowie eine Annäherung an wahrscheinlich vorhandene Potentiale bieten. Die technischen Maßnahmen um diese Potentiale zu erschließen, können beschrieben werden. Ohne Kenntnis über Verbreitung und Nutzung der Technologie bleibt eine Quantifizierung und damit die Empfehlung passgenauer Maßnahmen sowie das effiziente Erschließen dieser Potentiale verwehrt.

2 Nutzung der Drucklufttechnik und der hydraulischen Antriebe in Deutschland

2.1 Nutzung der Drucklufttechnik in der deutschen Wirtschaft

Energieübertragung mit Druckluft weist eine große Vielfalt auf. Eine Abgrenzung nach Branchen ist dabei nicht exakt möglich. Die BMU-Studie „Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch“ (Schmid et al., 2003) listet die wichtigsten Einsatzbereiche der Querschnittstechnologie Druckluft auf (vgl. **Tabelle 3**).

Tabelle 3: Einsatzbereiche der Drucklufttechnik nach Wirtschaftssektoren

Industriezweig	Industriezweig (Fortsetzung)
Bergbau	Baugewerbe
Chemische Industrie	Energiewirtschaft
holzverarbeitende Industrie	Gesundheitswesen
Hüttenwesen und Gießereien	Handwerksbetriebe
Kunststoffindustrie	Land- und Forstwirtschaft
Nahrungs- und Genussmittelindustrie	Umwelttechnik
Papierverarbeitende Industrie	Verkehrswesen
Textilindustrie	

Quelle: Schmid et al., 2003

2.1.1 Druckluftbereitstellung durch Kompressoren

Die Bereitstellung von Druckluft in Industrieunternehmen erfolgt in den allermeisten Fällen zentral über eine Kompressorstation. In dieser werden im Regelfall mehrere Kompressoren eingesetzt, teilweise werden auch die verschiedenen Verdichterbauarten kombiniert, um die jeweiligen Vorteile auszunutzen. So werden die klassischen Niederdrucknetze oftmals von Schraubenkompressoren, die Hochdrucknetze von Kolbenkompressoren versorgt. Neben den Kompressoren beinhalten Kompressorstationen auch Komponenten zur Druckluftaufbereitung wie z.B. Filter oder Trockner. Diese zusätzlichen Aufbereitungskomponenten nutzen, ausgenommen Kältetrockner², die Druckluft als Hauptenergiequelle zum Betrieb der Komponente und weisen somit keinen direkten elektrischen Energiebedarf auf. Der Strombedarf von Kältetrocknern kann in grober Näherung mit etwa 2-3 % des Strombedarfs der Kompressoren angenommen werden.

Die Verkaufszahlen von Kompressoren innerhalb der EU kann über die europäische Produktionsstatistik Prodcom ermittelt werden. Erfasst sind Schraubenkompressoren, Kolbenkompressoren und Turbokompressoren. Die Verkaufszahlen von Turbokompressoren sind unter Verschluss, da es zu wenige Hersteller auf dem Markt gibt. Kolbenkompressoren

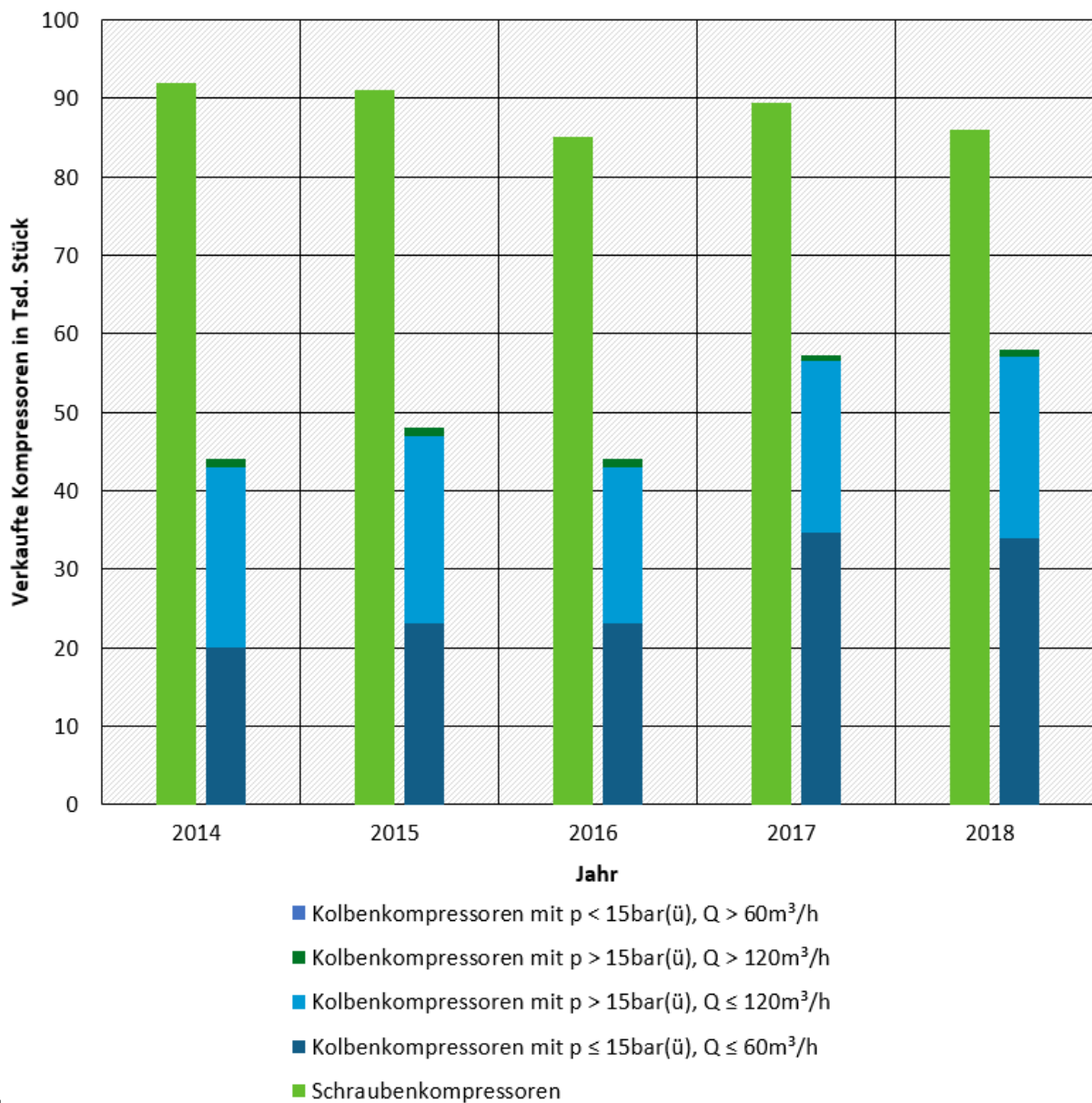
² Ein Kältetrockner wird in der Drucklufttechnik zum Trocknen von Druckluft verwendet. Hierzu wird der Luftstrom durch das Gerät geleitet und auf ca. 3-6°C abgekühlt. Hierdurch kondensiert ein Teil des in der Druckluft enthaltenen Wassers aus und wird abgeleitet. Im Anschluss wird die Druckluft wieder erwärmt, dies erfolgt oftmals im Gegenstromprinzip mit der Eintrittsseite. Die benötigte Kälteleistung wird über eine Kompressionskältemaschine bereitgestellt.

werden nach Procom in vier Kategorien nach Druck und Liefermenge eingeteilt, als Grenze ist ein Druck von 15 bar_ü definiert. Kompressoren unterhalb dieses Drucks werden in zwei Kategorien anhand der Liefermenge aufgeteilt, der Grenzwert ist 60 m³/h. Der Grenzwert von Kompressoren mit höherem Druck liegt bei 120 m³/h. Die Grenzwerte der Liefermengen entsprechen in grober Näherung³ elektrischen Leistungen von circa 10 kW bzw. 20 kW. Bei Schraubenkompressoren gibt es keine Unterteilung in Untergruppen.

In **Abbildung 10** sind die Verkaufszahlen von Schrauben- und Kolbenkompressoren der Jahre 2014 bis 2018 dargestellt. Die Verkaufszahlen von Kolbenkompressoren der Kategorie geringer Druck ($\leq 15 \text{ bar}_{\text{ü}}$) und großer Liefermenge ($> 60 \text{ m}^3/\text{h}$) sind auf Grund der eingeschränkten Anzahl an Herstellern unter Verschluss. Anhand der Verkaufszahlen der Kolbenkompressoren lässt sich schließen, dass diese hauptsächlich im kleinen Leistungsspektrum bis 10 bzw. 20 kW verkauft werden. Die Abbildung macht deutlich, dass Schraubenkompressoren die dominierende Bauform darstellen. Dies zeigt sich auch in der Auswertung der Umsätze durch den Verkauf von Kompressoren in Deutschland (vgl. **Tabelle 4**). Mit circa 670 Mio. Euro ist der Verkauf von Schraubenkompressoren für circa 80% des jährlichen Umsatzes von Kompressorverkäufen verantwortlich. Der Preis eines Kompressors korreliert mit dessen Nennleistung. Folglich lässt sich aus den Umsatzzahlen in Kombination mit den Verkaufszahlen schlussfolgern, dass die verkauften Schraubenkompressoren im Durchschnitt eine größere Nennleistung besitzen. Die Marktverhältnisse sind stabil, so dass weder eine eindeutige Steigerung noch ein Absinken der Verkaufszahlen ersichtlich ist.

³ Die Leistungsaufnahme der Kompressoren ist vom Verdichtungsdruck abhängig, da dieser in den Kategorien schwankt, ist die Umrechnung für den Grenzfall 15 bar_ü erfolgt. Höhere Drücke führen zu größeren benötigten Leistungen.

Abbildung 10: Verkaufszahlen von Kompressoren in Deutschland



Quelle: (PRODCOM, 2018), eigene Darstellung IER

Tabelle 4: Umsatz der Verkäufe von Kompressoren in Deutschland

Bezeichnung	2016 [Mio. €]	2017 [Mio. €]
oszillierender Verdrängerkompressor, zur Erzielung von Überdruck $v \leq 15\text{bar}$, Liefermenge $\leq 60\text{m}^3/\text{Std}$	41,2	48
oszillierender Verdrängerkompressor, zur Erzielung von Überdruck $v \leq 15\text{bar}$, Liefermenge $> 60\text{m}^3/\text{Std}$	15,2	13,6
oszillierender Verdrängerkompressor, zur Erzielung von Überdruck $v > 15\text{bar}$, Liefermenge $\leq 120\text{m}^3/\text{Std}$	73,2	75,1
oszillierender Verdrängerkompressor, zur Erzielung von Überdruck $v > 15\text{bar}$, Liefermenge $> 120\text{m}^3/\text{Std}$	53,3	46,8
Schraubenkompressoren, mehrwellig	677,2	661,7

Quelle: (VDMA & VDMA Verlag GmbH, 2018)

In der Drucklufttechnik wird der Wirkungsgrad eines Kompressors nicht in Form eines prozentualen Werts angegeben. Die Angabe der Effizienz eines Kompressors erfolgt über die spezifische Leistung. Dieser Wert entspricht dem Quotienten aus Leistung des Kompressors bei einem definierten Betriebsdruck zu dem hierzu bereitgestellten Volumenstrom durch den Kompressor. Die spezifische Leistung wird üblicherweise in $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ angegeben, je kleiner die spezifische Leistung bei einem definierten Betriebspunkt ist desto besser der Wirkungsgrad des Kompressors. Auf Grund der Kompressibilität der Luft ist jedoch zu beachten, dass die spezifische Leistung in direkter Abhängigkeit zum herrschenden Druckverhältnis steht. Eine höhere Verdichtung führt aus Gründen der Thermodynamik unweigerlich zu einer höheren spezifischen Leistung des Kompressors. Für einen korrekten Vergleich sollten demnach gleiche Betriebsbedingungen herrschen.

2.1.2 Pneumatik

Pneumatikanwendungen sind technisch einfach zu realisieren, ihre Installation ist kostengünstig und sie bieten prinzipbedingt eine Sicherheit gegen Überlastung. Gegenüber mechanischen Getrieben zeichnen sich pneumatische Antriebe durch eine freie Übersetzungswahl, eine einfache Übertragung von Energie über mittlere Distanzen und sehr geringe Gewichte im kleinen bis mittleren Leistungsbereich sowie geringe Kosten aus. Sie verfügen prinzipbedingt über geringere Steifigkeiten als hydraulische und mechanische Übersetzungen, wodurch präzise Positionierungen deutlich aufwändiger sind als mit mechanischen oder hydraulischen Antrieben. Deshalb werden pneumatische Antriebe schwerpunktmäßig für einfache Bewegungsaufgaben eingesetzt.

Die räumliche Entkopplung von Druckluftbereitstellung und –nutzung ist ein technischer Vorteil, der große Leistungsdichten am Aktor und geringen Aufwand bei der Integration neuer Komponenten ermöglicht, jedoch die Betrachtung der Energieeffizienz des Gesamtsystems erschwert. Die Erzeugung von Druckluftenergie geht mit einer zusätzlichen Wandlung der mechanischen Energie einher, weshalb die Wirkungsgrade geringer sind als bei direkter mechanischer Übertragung. Gleichzeitig können Einsparungen über lange Zeiträume ohne Energiezufuhr aufrechterhalten werden. Pneumatische Aktoren werden überwiegend für Pick&Place Anwendungen, also die Bewegung zwischen zwei Anschlägen genutzt.

Die größten Industriebranchen in Deutschland, in denen Druckluftantriebe zur Anwendung kommen sind⁴:

- ▶ Lebensmittel, Getränke, Verpackung (15% Umsatzanteil in D),
- ▶ Bestückungsanlagen Elektroindustrie (20% Umsatzanteil in D) und
- ▶ Fahrzeugindustrie (17% Umsatzanteil in D).

Druckluft wird in vielen Fällen mit elektromotorisch betriebenen Kompressoren erzeugt; große Turbokompressoren im Leistungsbereich über 1 MW werden teilweise mit Gas- oder Dampfturbinen angetrieben. Sie werden beispielsweise in der Papier- Stahl- oder chemischen Industrie eingesetzt, zum Teil auch zur Vakuumerzeugung. Für diese großen Kompressoren liegen keine Verkaufszahlen oder Energiebedarfsabschätzungen vor.

⁴ Quelle: eigene Befragungen

2.1.3 Vakuumtechnik

Als Vakuum wird die Abwesenheit von Molekülen bezeichnet. Diese äußert sich in einem verminderten Druck, der unterhalb des Umgebungsdrucks liegt. Vakuumschichten lassen sich in vier verschiedene Bereiche einteilen (Demtröder, 2008):

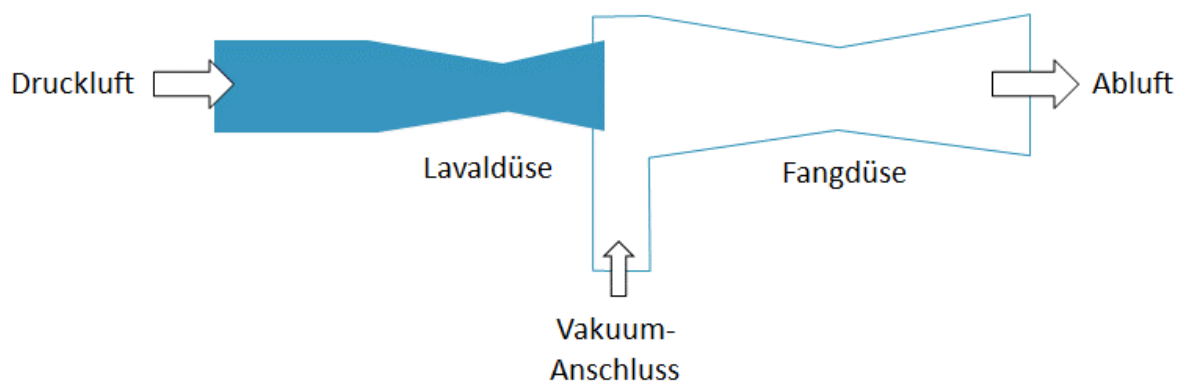
- ▶ Grobvakuum: 1 - 1000 mbar_a,
- ▶ Feinvakuum: 10⁻³ – 1 mbar_a,
- ▶ Hochvakuum: 10⁻⁷ – 10⁻³ mbar_a und
- ▶ Ultrahochvakuum: < 10⁻⁷ mbar_a.

Die Bereitstellung von Vakuum kann mittels Druckluftejektoren oder Vakuumpumpen erfolgen. Druckluftvakuumanwendungen arbeiten im Bereich von 20 – 1000 mbar_a und sind somit ausschließlich auf den Bereich Grobvakuum beschränkt. Die pneumatische Vakuumtechnik ist mengen- und wertmäßig ein Sonderfall im Bereich der Pneumatik-Anwendungen.

In der Industrie wird an vielen Stellen Vakuum benötigt, beispielsweise für diverse verfahrenstechnische Prozesse oder im Bereich Verpackung. In diesen Bereichen werden jedoch meist große Volumenströme und hohes Vakuum benötigt, weshalb hier in den meisten Fällen auf Vakuumpumpen zurückgegriffen wird. Druckluftbetriebenes Vakuum wird vorrangig in der Handhabungstechnik eingesetzt. Hierzu zählen beispielsweise Automatisierungsanlagen oder Industrieroboter. Häufig handelt es sich um Pick&Place-Anwendungen.

Druckluftejektoren nutzen Druckluft als Antriebsmedium, um einen Saugvolumenstrom bereitzustellen. Der Aufbau eines einfachen, einstufigen Ejektors ist in **Abbildung 11** erläutert. Die Druckluft wird in einer Lavalldüse entspannt und dabei auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt. Der beschleunigte Luftstrahl wird über einen Spalt in eine Fangdüse geleitet und erzeugt einen Unterdruck in der Saugleitung. Der Luftstrahl wird im Anschluss, üblicherweise über einen Schalldämpfer, in die Umgebung abgeblasen. Ist keine Rückschlagklappe im Vakuumsystem vorhanden, muss die Druckluft zur Aufrechterhaltung des Vakuums stetig fließen. Systeme mit Rückschlagklappe werden als Ejektoren mit Luftsparfunktion bezeichnet. Zusätzlich zur Rückschlagklappe wird das Vakuum mittels Drucksensor überwacht, um ein sicheres Handling zu ermöglichen. Für das Absetzen des Werkstücks wird ein kurzer Abblasimpuls benötigt. Ejektoren mit Luftsparfunktion sind auf Grund der zusätzlichen Bauteile in der Anschaffung teurer als Standardejektoren.

Neben den einstufigen Ejektoren, existieren auch mehrstufige Ejektoren. Hierbei wird die Mischung aus Druckluft und angesaugter Luft in einer weiteren Lavalldüse entspannt, wodurch die verbleibende Restenergie besser ausgenutzt wird. Typischerweise werden zwei bis drei Düsenstufen verwendet. Durch die zusätzlichen Stufen steigt die Evakuierungsgeschwindigkeit bei geringem Vakuumniveau. Für ein tieferes Vakuumniveau kehrt sich dieser Effekt um. Um diesen Effekt zu dämpfen, werden die einzelnen Saugkammern der Stufen mit Rückschlagklappen versehen. So verwendet ein mehrstufiger Ejektor bei tiefem Vakuumniveau lediglich eine Stufe. Ein Vergleich von einstufigen und mehrstufigen Druckluftejektoren ist in Kapitel 3.2.2.1 enthalten.

Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines einstufigen Druckluftejektors

Quelle: eigene Darstellung IER

Es existieren keine Daten zum Luft- und damit verbunden auch Energiebedarf aller in Deutschland verwendeten druckluftbetriebenen Vakuumerzeuger. Folglich sind hierzu keine belastbaren Aussagen möglich.

Die wichtigsten Abnehmerbranchen von druckluftbetriebenen Vakuumerzeugern sind: Elektronik und Montage mit einem Umsatzanteil von circa 35%, Nahrungsmittel und Verpackung (circa 18%) und Automobil mit circa 9%.

2.1.4 Energiebedarf der Druckluftherzeugung in Deutschland

Zum Energiebedarf der Druckluftherzeugung in Deutschland sind keine auf Messdaten basierenden Auswertungen der letzten 20 Jahre verfügbar. Die Studie „Compressed Air Systems in the European Union“ (Radgen & Blaustein, 2001) wird bis heute als Quelle vieler Veröffentlichungen sowie der Berechnungen der AG Energiebilanzen genutzt, welche jährlich Schätzungen zum Energiebedarf der Druckluft abgibt (AGEB, 2018). Dabei stützt sich die vorgenommene Modellierung auf die Analyse von 19 Unternehmen EU-weit für Kompressoren zwischen 10 kW und 300 kW sowie Experteninterviews. Mit diesen Daten werden Modelle parametrisiert, die den Energiebedarf simulieren.

Eine weitere Studie von Schmid et al. untersucht die Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs in Industrie und Kleinverbrauch (Schmid et al., 2003).

Detaillierte und aktuelle Daten liegen für den Deutschen Bilanzraum nicht vor.

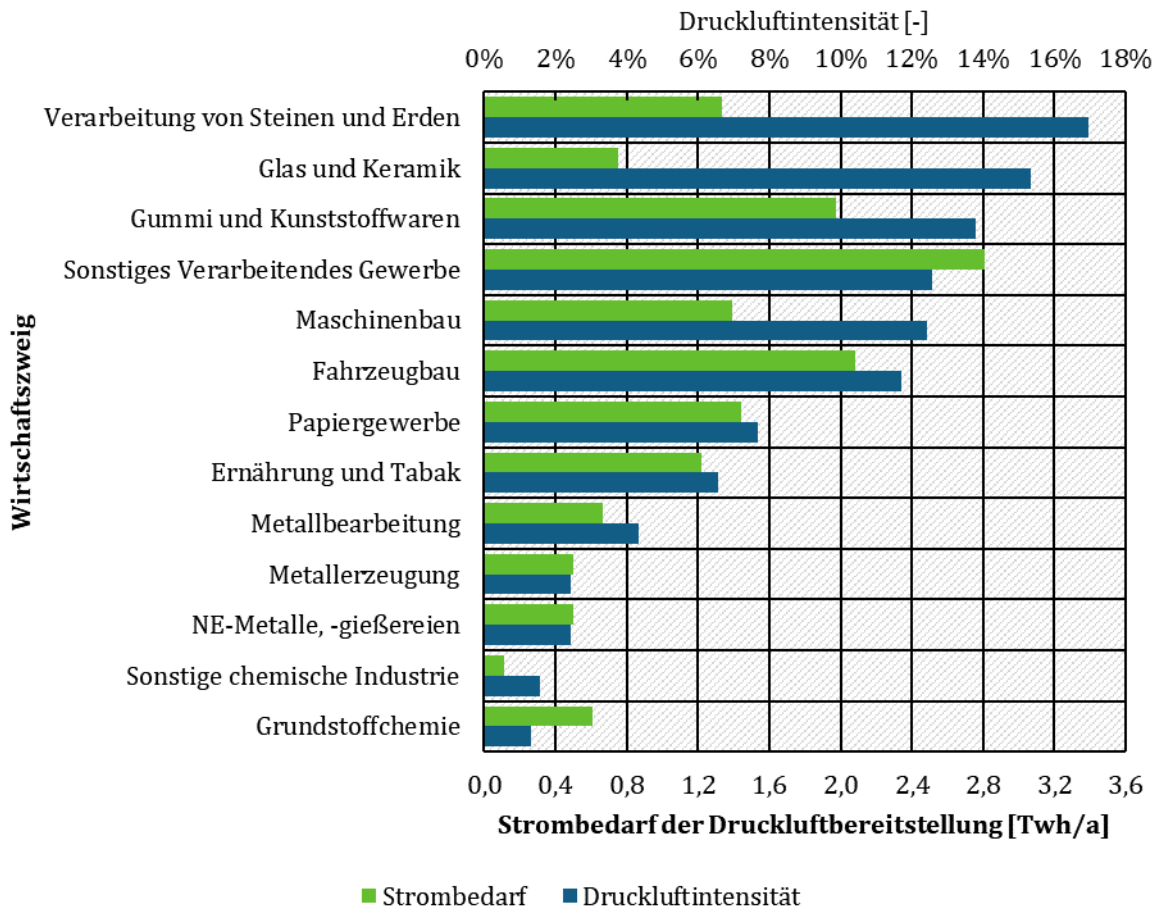
Für die gesamte Druckluftbereitstellung wird von der AGEB ein Anteil von ca. 7% der industriell genutzten Elektroenergie als realistisch angenommen (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2019). Umgerechnet auf den deutschen Bilanzraum ist das eine Energiemenge von 16 TWh. Da sich diese Erhebungen auf die Studie von Radgen und Blaustein (Radgen & Blaustein, 2001) beziehen, ist der Energiebedarf der Turbokompressoren nicht enthalten. McKane und Hasanbeigi (McKane & Hasanbeigi, 2010) beziffern die für Druckluftherzeugung aufgewendete Energie mit Kompressoren >1000 PS⁵ auf ca. 20% in der EU. Diese Energiemenge ist in den Daten der AGEB nicht enthalten, da in diesem Leistungsbereich meist Turbokompressoren für die Energiewandlung verwendet werden. Für die Aufteilung der Druckluft auf die verschiedenen Branchen und Anwendungsbereiche liegen keine Daten vor, die AGEB Daten lassen jedoch Rückschlüsse auf die Branchenaufteilung zu.

Abbildung 12 führt den jährlichen Strombedarf für die Druckluftbereitstellung aller in (AGEB, 2018) betrachteten Branchen, sowie die jeweilige Druckluftintensität auf. Die

⁵ 1000PS entsprechen etwa 735kW. Ab dieser Nennleistung werden fast ausschließlich Turbokompressoren eingesetzt.

Druckluftintensität beschreibt den Anteil des Stromverbrauchs der Druckluftbereitstellung bezogen auf den Gesamtstrombedarf der Branche. Im Durchschnitt haben alle Branchen eine Druckluftintensität von 7%. Diese variiert jedoch stark nach Branche. So haben beispielsweise die Branchen „Glas und Keramik“, sowie „Gummi und Kunststoffwaren“ eine hohe Druckluftintensität von 15% bzw.14%.

Abbildung 12: Branchen in Deutschland mit dem höchsten Stromverbrauch für die Druckluftbereitstellung (Jahr: 2017)



Quelle: (AGEB, 2018), Darstellung: IMM

Die Beschreibung der Energiebilanz einer Technologie umfasst neben dem Betrieb auch die Emissionen während Herstellung und Weiterverwendung oder Entsorgung. Ein generalisierter vierschrüttiger Ansatz hierfür ist in DIN ISO 14044 beschrieben und im technischen Leitfaden „Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification“ ISO 14067:2018 (N, 2018b) dokumentiert.

Der CO₂-Footprint pneumatischer Antriebe wird von Merkelbach (Merkelbach, 2020) beispielhaft an einem pneumatisches Antriebssystem hinsichtlich der Treibhausgasemissionen während des Lebenszyklus analysiert. Er kommt dabei während eines 5-jährigen Lebenszyklus eines Pneumatikzylinders mit 32 mm Durchmesser und 200 mm Hub im Einschichtbetrieb mit 400 Zyklen/Stunde auf insgesamt ca. 565 kg CO₂. 97% der Emissionen entfallen auf den Betrieb der Anlage, 3% auf Herstellung, Transport und Entsorgung. Die Anteile geben trotz des willkürlich gewählten Beispiels einen Eindruck für weitere Applikationen.

2.2 Nutzung hydraulischer Antriebe im Bilanzraum Deutschland

Hydraulische Antriebe werden vorwiegend für das Bewegen großer Lasten und/oder zur Übertragung großer Leistungen auf kleinem Bauraum genutzt. Für eine systematische Betrachtung ist eine Unterteilung in mobilhydraulische und stationärhydraulische Systeme sinnvoll. Beide Klassen hydraulischer Antriebe unterliegen deutlich unterschiedlichen Anforderungen und werden mit verschiedenen Energiequellen versorgt. Mobile Arbeitsmaschinen sind bewegliche, hauptsächlich bediener*innen geführte Maschinen mit weitem Einsatzspektrum, die heute fast ausschließlich mit Verbrennungskraftmaschinen angetrieben werden und über vergleichsweise kleine Mengen Druckflüssigkeit verfügen. Stationäre Maschinen mit hydraulischer Antriebstechnik werden von Elektromotoren angetrieben und führen in der Mehrheit definierte Arbeitsspiele mit hohem Automatisierungsgrad bei größeren Anforderungen an Leistungsdichte, Dynamik und Präzision aus.

2.2.1 Mobile Arbeitsmaschinen

Mobile Arbeitsmaschinen sind ortsveränderliche Maschinen, die neben dem Fahren weitere Aufgaben zur Zweckerfüllung übernehmen. Sie können branchenspezifisch eingeteilt werden in:

► *Baumaschinen*

Bagger, Lader, Planiertrappen, Straßenbaumaschinen (z.B. Walzen, Straßenfertiger), Tunnelvortriebsmaschinen, Betonpumpen;

► *Landmaschinen*

Traktoren, Mähdrescher, Forstmaschinen, Erntemaschinen, Schwadmäher;

► *Fördertechnik*

Krane, Gabelstapler, Schaufelradbagger;

► *Kommunalfahrzeuge*

Müllfahrzeuge, Kehrfahrzeuge, Feuerwehrfahrzeuge, selbstfahrende Mähmaschinen, Pistenraupen;

► *Sonstige*

Flugzeugschlepper, Winden, Auslegermaste, ...

Mengen- und wertmäßig ist dabei die Baumaschinenbranche der größte Abnehmer von fluidtechnischen Komponenten und Systemen. Bagger und Radlader sind dabei die mit großem Abstand meistverkauften sowie im Bestand befindlichen mobilen Arbeitsmaschinen in Deutschland (**Tabelle 5**). Sie benötigen ca. 56% des Gesamtkraftstoffbedarfs aller Baumaschinen (Fecke, 2018).

Tabelle 5: Absätze von Baumaschinen in Deutschland und Westeuropa

Absätze von Baumaschinen in Deutschland und Westeuropa (inkl. D) im Jahr 2019, Marktabdeckung ca. 100%

Klasse	Stückzahl/Jahr
Raupenbagger <12t	18.000
Raupenbagger >12t	4.000

Klasse	Stückzahl/Jahr
Mobilbagger	4.000
Radlader	14.000
Kompaktlader	500
Baggerlader	<100
Planiertrauben	400
Motor Grader	100
Muldenkipper (starr und knickgelenkt)	400

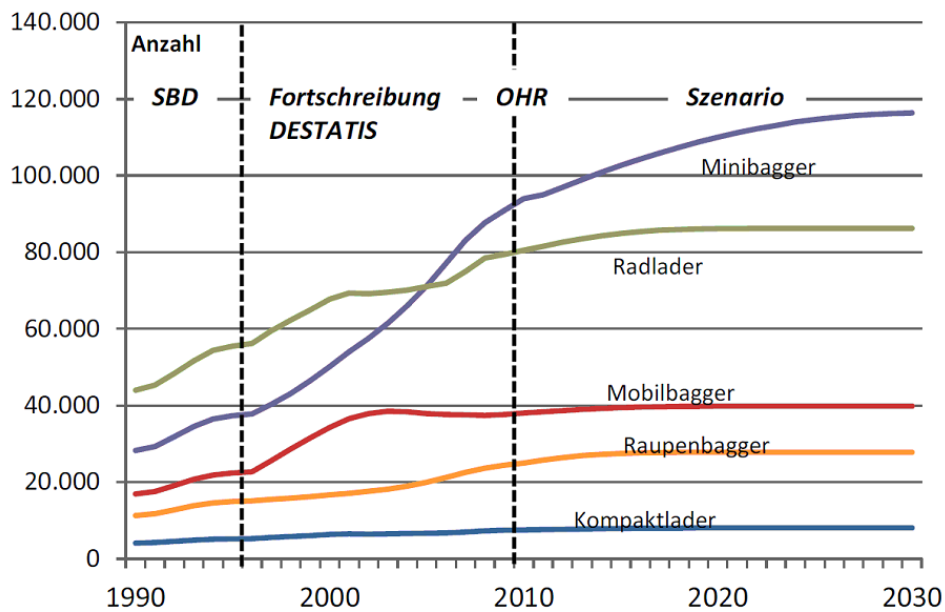
Quellen: Off-Highway Research, VDMA

Tabelle 6: Bestände von Baumaschinen

Bestände nach Maschinenkategorie in Bauwirtschaft und Industrie, 2010

Maschinenkategorie	Anzahl	Maschinenkategorie	Anzahl
Betonmischer	110.586	Teleskoplader	3.900
Betonpumpen	2.518	Dumper/Muldenkipper	6.500
Mobil- und Autokrane	5.092	Grader, Straßenhobel	1.508
Minibagger	94.000	Straßenfertiger	3.003
Raupenbagger	25.000	Planiertrauben	5.000
Mobilbagger	38.000	Verdichtungsmaschinen	227.810
Baggerlader	5.005	Rammbären	3.583
Radlader	80.500	Kompressoren	87.060
Raupenlader	1.000	Generatoren	25.097
Kompaktlader	7.500	Stapler	146.085

Quelle: (Helms & Heidt, 2014)

Abbildung 13: Entwicklung und Prognose des Baumaschinenbestands

©IFEU 2013. Quellen: [DESTATIS 2011; OHR 2011; SBD]; eigene Annahmen und Berechnungen

Quellen: Helms & Heidt, 2014

Tabelle 6 und **Abbildung 13** zeigen Bestände und prognostizierte Entwicklungen der Baumaschinenbestände. Bei 30.000 Neuzulassungen im Jahr 2018 existieren in Deutschland ca. 1,5 Millionen Bestandstraktoren sowie ca. 300.000 Selbstfahrer (Forst- und Erntemaschinen).

2.2.2 Energiebedarf mobiler Maschinen

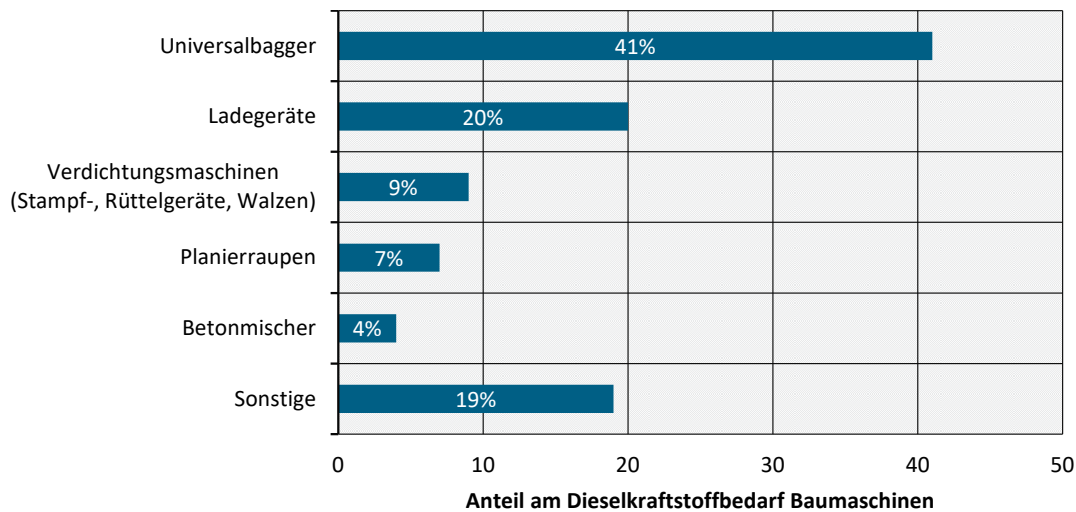
Aus den Absatzzahlen kann ohne Kenntnis des Einsatzes der Maschinen, der aktiven Population sowie der Lastspiele und der Energiebedarfe nur bedingt auf den Energiebedarf und somit den CO₂-Ausstoß geschlossen werden.

Da viele Maschinen in größerer Stückzahl als Serienprodukte verkauft werden und die Arbeitsaufgaben und Lastspiele klarer definiert sind als bei Individualmaschinen, lassen sich vereinfachte Modellrechnungen hierzu erstellen.

Helms und Heidt (Helms & Heidt, 2014) beziffern den Energiebedarf mobiler Arbeitsmaschinen (Bau- und Landwirtschaft) in Deutschland mit 53,6 TWh (193 PJ). Sie modellieren die Emissionen mobiler Maschinen dabei im Rahmen einer für das BMU durchgeführten Studie mit einem etablierten und detailliert beschriebenen Berechnungsmodell, welches mit dem Bestand, der angenommenen Anzahl der Betriebsstunden, der Nennleistung, sowie einem angenommenen durchschnittlichen Lastfaktor parametrisiert wird. Bauer und Winz (Bauer & Winz, 2015) beschäftigen sich in einer Studie für die FVB mit der Erhebung weiterer Daten, können das Modell von Helms und Heidt weder umfangreich validieren noch widerlegen.

Abbildung 14: Dieselkraftstoffbedarf anteilig an Baumaschinen in Deutschland, nach Typ

Datenbasis Deutschland, Jahr 2009



Quelle: (Helmus & Fecke, 2015), Darstellung: IMM

Helmus und Fecke berechnen, dass 61% des Kraftstoffbedarfs der Baumaschinen in Deutschland durch Universalbagger und Lader verursacht wird (**Abbildung 14**). Baumaschinen verfügen über einen großen Hydraulikanteil, der bei Baggern und Ladern in der Regel über 90% beträgt (Antriebe für Fahren, Lenkung, Lüfter, Arbeitshydraulik). Bei anderen Baumaschinen kann dieser auch deutlich geringer ausfallen. Insgesamt wird ein durchschnittlicher Anteil von 75% für hydraulische Antriebe in Baumaschinen angenommen.

Für den Landmaschinenbereich gibt das Kraftfahrt-Bundesamt Zulassungen und Bestand an Nutzfahrzeugen an (Kraftfahrt-Bundesamt, 2016). Wird ein Dieselbedarf für den landwirtschaftlichen Bereich von 100 Litern Diesel pro Hektar im Jahr angenommen (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2020), ergibt sich bei einer bewirtschafteten Fläche von ca. 17 Mio. Hektar (BMEL, 2017) ein jährlicher Dieselbedarf von ca. 1,7 Milliarden Litern, was bei 9,8 kWh/Liter einer Energiemenge von ca. 16,6 TWh sowie einem CO₂-Ausstoß von ca. 4,4 Mio. t CO₂ pro Jahr (2,65 kg/l) und damit weniger als der Hälfte der Emissionen der Bauwirtschaft entspricht. Landmaschinen verfügen in der Regel über einen mechanischen oder einen hydraulisch-leistungsverzweigten Fahrtrieb. Die Energie für Anbaugeräte wird entweder vom Fahrtrieb, der Zapfwelle oder durch die Baggerhydraulik aufgebracht. Erntemaschinen hingegen verfügen über einen größeren Teil hydraulischer Antriebe mit denen zahlreiche Funktionen auf dem in der Regel stark limitierten Bauraum realisiert werden. Ein durchschnittlicher hydraulischer Anteil am Energieumsatz von 50% wird hier als realistisch angenommen. **Tabelle 7** zeigt den Energiebedarf und den CO₂-Ausstoß pro Jahr.

Tabelle 7: Energiebedarf mobiler Maschinen

Maschinengruppe	Energie [TWh]	Ø Anteil Hydraulik	Energie [TWh]	CO ₂ -äq. [Mio.t]
Baumaschinen	37	75%	27,7	14,7
Landmaschinen	16,6	50%	8,3	4,4
Summe	53,6		36	19,1

2.2.3 Stationärhydraulik

Hydraulische Antriebe finden Anwendung in einer großen Bandbreite stationärer Maschinen, vorwiegend im Schwermaschinenbau. Wichtige Branchen stationärhydraulischer Maschinen sind:

▶ *Bergbau- und Fördertechnik*

Förderbänder, Schaufelräder, Brecher-/Zerkleinerer;

▶ *Pressen und Metallurgie*

Tiefzieh-, Ringwalz- und Schmiedepressen, Walzanlagen, Kokillenzillationsantriebe;

▶ *Kunststoff- Gummi und Druckgussmaschinen*

Werkzeugbewegungen, Förderschnecken, Spritz- und Schussachsen;

▶ *Werkzeugmaschinen*

Wasserstrahlschneiden, Spannfunktionen, CNC-Achsen;

▶ *Weitere*

Antriebe von Schotten, Schleusen, Sperrventile, Öl- und Schlammumpen.

Diese Maschinen weisen eine große Variabilität der Einsatzbedingungen auf, z.B.:

- ▶ mehrere Aktoren unterschiedlicher Leistung,
- ▶ unterschiedlicher räumlicher Verteilungsgrad,
- ▶ Anforderungen an Gewicht und Leistungsdichte,
- ▶ notwendige Absicherung gegen Überlasten sowie
- ▶ diverse Anforderungen hinsichtlich Dynamik und Positioniergenauigkeit.

Aufgrund des großen Individualisierungsgrads sind eine Zuordnung von Maschinenklassen zu Lastspielen sowie die Bestimmung typischer Betriebs- oder Standzeiten ohne repräsentative Feldstudien oder Befragungen nicht möglich. Schätzungen zum Bestand von Maschinen sind aus den Umsatzzahlen nicht ohne Weiteres möglich, da diese stark durch Exporte und Importe beeinflusst sind. Die umsatzstärksten Branchen sind Fördertechnik, Werkzeugmaschinen- Straßenfahrzeug- sowie der Kunststoff- und Gummimaschinenbau (siehe Abbildung 8).

2.2.4 Energiebedarf der Stationärhydraulik

Stationärhydraulische Maschinen werden mit Elektromotoren angetrieben. Nach Klassifikation der Wirtschaftszweige der Statistischen Ämter WZ 2008 (N, 2008, p. 2) finden sich Anlagen der Stationärhydraulik in den Klassen A (Bergbau), B (Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) sowie C (Verarbeitendes Gewerbe). Die AG Energiebilanzen bezeichnet die Klassen A, B und C (ohne Raffinerien) als „Industrie“. Vergleichbare Erhebungen wie bei Land- und Baumaschinen zum Bestand und auch zum Energiebedarf liegen nicht vor.

Eine Studie der US Energieagentur aus dem Jahr 2002 (XENERGY inc., 2002) beziffert den Anteil der von Elektromotoren umgesetzten Energie, die zum Antrieb von Pumpen verwendet wird nach Industrien auf:

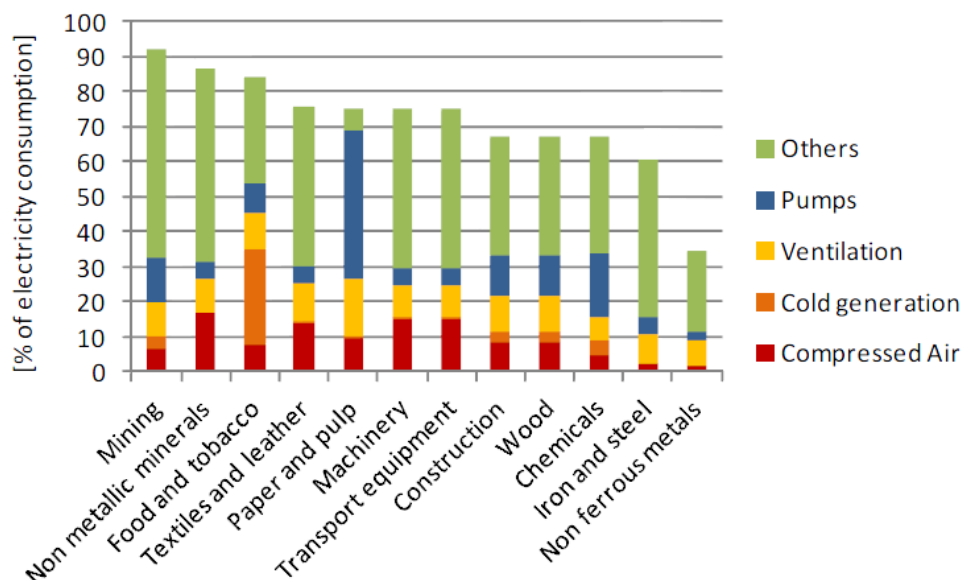
- ▶ 16% in der Lebensmittelindustrie,
- ▶ 31% in der Papierindustrie,
- ▶ 26% in der chemischen Industrie,
- ▶ 59% in der Kohle und Petrochemischen Industrie und
- ▶ 8,7 % in der Metallverarbeitung.

Der Durchschnitt der verarbeitenden Industrien beträgt 25%. Hydraulische Verdrängereinheiten als Untergruppe der Pumpen sind nicht explizit ausgewiesen.

Im Bilanzraum der EU (12 Mitgliedsstaaten im Jahr 2001) geht der SAVE Report (ETSU & AEAT PLC, 2001) von 20% der in der Industrie genutzten Elektroenergie aus, was für das Jahr 2018 einer Energiemenge von 46 TWh für Pumpenantriebe im Bilanzraum Deutschland entsprechen würde.

Eichhammer und Fleiter nehmen in Ihrer Studie „Energy Efficiency in Electric Motor Systems Technology“ (Eichhammer & Fleiter, 2012) S. 17 für den Bilanzraum EU-27 den Anteil der industriellen Elektroenergie nach Branchen an:

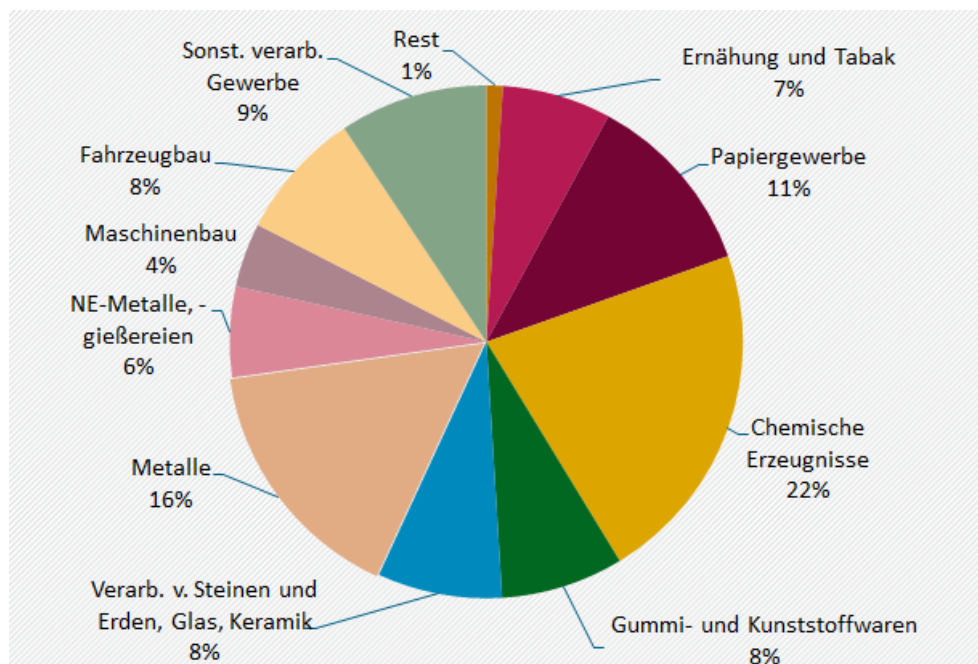
Abbildung 15: Annahme des Energiebedarfs nach elektromotorgetriebenen Anwendungen



Source: Own estimations based on (Elliot and Nadel, 2003; ETSU et al., 2001; Radgen, 2002; Radgen and Blaustein, 2001; XEnergy, 2001).

Quelle: (Eichhammer & Fleiter, 2012)

Eine grobe Schätzung der Elektroenergie zur Erzeugung mechanischer Energie für den Bilanzraum Deutschland erfolgt jährlich durch die AG Energiebilanzen. **Abbildung 16** zeigt die von der AGEb angenommene Verteilung auf die Branchen.

Abbildung 16: Mechanische Energie aus Elektroenergie

Quelle: (Rohde, 2019), Darstellung IMM

Die zum Pumpen notwendige Elektroenergie wird darin für 2018 mit 20,4 TWh abgeschätzt, was 13% der in mechanische Energie gewandelten Elektroenergiemenge entspricht (Rohde, 2019) und damit der Hälfte der in der SaveII-Studie (ETSU & AEAT PLC, 2001) angegebenen Energiemenge. Abzüglich der Chemiebranche (4,5 TWh), in der vergleichsweise wenig hydraulische Antriebe verwendet werden, ergeben sich maximal 15,9 TWh für Pumpenantriebe in relevanten Industriezweigen. Zusätzlich werden im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 32 TWh in mechanische Energie gewandelt. Wird der gleiche Anteil wie in der Industrie angenommen, ergeben sich 4,2 TWh für Pumpenantriebe im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor.

Von diesen insgesamt angenommenen 15,9+4,2 TWh für Pumpenantriebe sind Hydraulikpumpen eine Untermenge die jedoch große Leistungen umsetzen. Sie wandeln den wesentlichen Teil der Energie in hydraulischen Systemen. Ein Anteil von weniger als 50% dieser Energiemenge für Hydraulikanwendungen, also <10 TWh scheint realistisch.

Auch in der Studie (Schmid et al., 2003) wird der Bestand von Pumpensystemen in Industrie und Kleinverbrauch betrachtet. Pumpensysteme werden in allen Bereichen zur Förderung flüssiger Medien, z.B. Wasser (Heiz-)öl, Treibstoff, Chemikalien, Abwasser, Kälte- oder Wärmemittel eingesetzt, die meist mit Drücken unter 10 bar zum Befüllen, Entleeren, Umpumpen, Umwälzen oder Dosieren eingesetzt werden. Pumpen für Hochdruckanwendungen wie die Hydraulik sind von der Stückzahl deutlich geringer jedoch von der Leistung meist deutlich größer. Die Studie kommt zum Schluss, dass mangels Daten keine Aussage über den Energiebedarf getroffen werden kann. Zur Aufteilung der mechanischen Energie auf Antriebssysteme kann somit keine differenzierte Aussage getroffen werden.

2.2.5 Hydrauliksysteme in der Luftfahrt

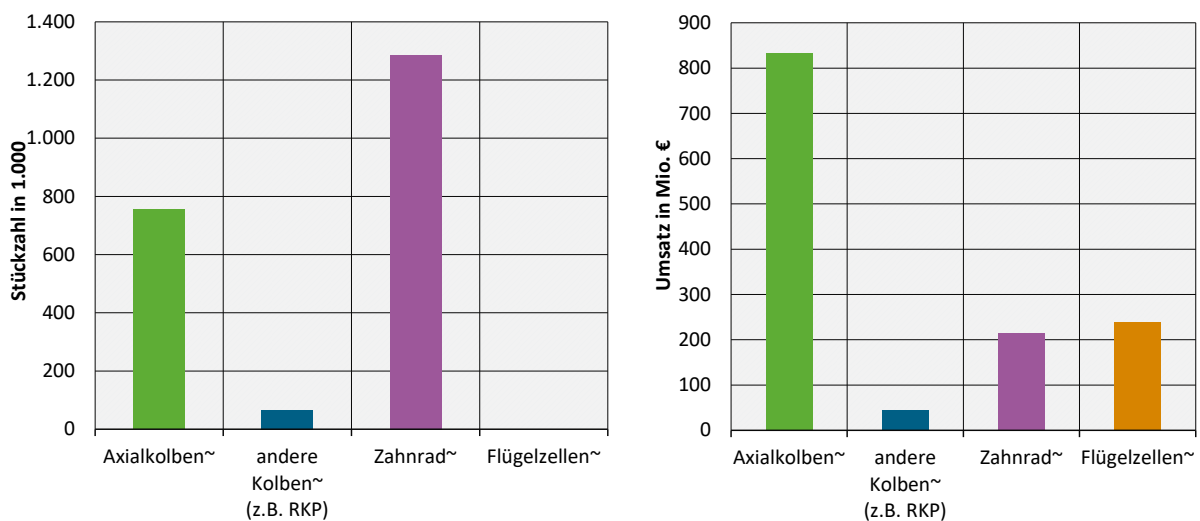
Die Luftfahrtbranche als Kunde hydraulischer Antriebstechnik wird in dieser Studie nicht betrachtet, da dort die Bedeutung der Energieeffizienz kein entscheidender Faktor für den Einsatz von Komponenten und Systemen ist, wenngleich die Diskussion um den Einsatz von hydraulischen und elektromechanischen Antrieben auch dort geführt wird. Starke

Sicherheitsregulierungen sowie der große Einfluss des Gewichts schränken den Raum für die Entwicklung energieeffizienter Technologie zusätzlich ein. Eine Abschätzung der Effizienzpotentiale in diesem Bereich geht über den Umfang dieser Studie hinaus.

2.2.6 Verdrängereinheiten

Die Fluidtechnik-Industrie ist im Bilanzraum Deutschland stark vertreten; viele Hydraulikkomponenten werden in Deutschland gefertigt und in Maschinen und Anlagen verbaut oder direkt exportiert. Die zur Produktion von Verdrängereinheiten geführten Statistiken des statistischen Bundesamtes für Unternehmen mit über 20 Mitarbeitenden geben für 2017 einen Produktionswert von 1,3 Mrd. Euro für Hydropumpen an. Die Flügelzellenpumpen sind Stückzahlenmäßig nicht erfasst, die anderen Pumpentypen haben zusammen ein Marktvolumen von 2,1 Mio. Einheiten (**Abbildung 17**).

Abbildung 17: Jahresproduktion von Hydropumpen: Stückzahlen und Umsatz 2017



Quelle: (statistisches Bundesamt, n.d.), Darstellung IMM

Darüber hinaus existieren kommerzielle „Reports“, welche Verkäufe und Anwendungen von Verdrängereinheiten in den wirtschaftlich wichtigsten Regionen weltweit abschätzen, die den Autoren dieser Studie nicht oder nur auszugsweise vorlagen. Solche Studien werden z.B. angeboten über marketsandmarkets.com, alliedmarketresearch.com, courant.biz, nxtgenreports.com, credenceresearch.com, marketintellica.com. Zu Quellenlage, Methodik und Informationsgehalt der Studien machen die Autoren auch auf Anfrage keine Angaben.

Zu den Verkäufen von Verdrängereinheiten im Bezugsraum Europa, dem mittleren Osten und Afrika lassen sich nach Befragungen großer Hersteller folgende Aussagen treffen:

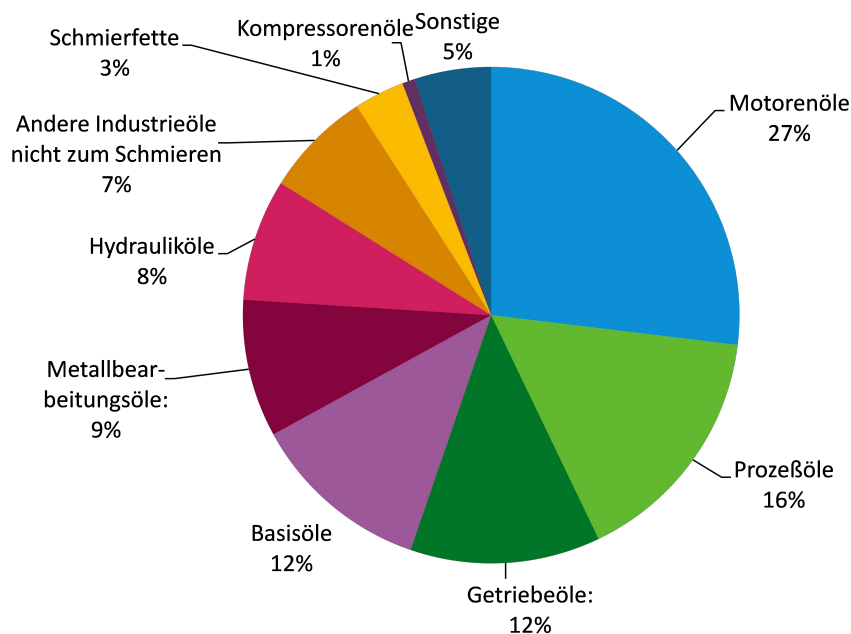
- ▶ 90% der verkauften Verdrängereinheiten sind <250 ccm.
- ▶ Das Marktvolumen beträgt weltweit knapp 8 Millionen Stück/Jahr.
- ▶ Die Hälfte der verkauften Einheiten haben einen Druckbereich >250 bar.
- ▶ Axialkolbenmaschinen machen ca. 30% der Stückzahl, Zahnradmaschinen 50% der Stückzahl aus.

- ▶ Deutschland, Italien und Frankreich kaufen 60% aller im Bezugsraum gefertigten Einheiten; wo die Einheiten letztlich betrieben werden ist nicht zu ermitteln.
- ▶ Deutschland kauft 3,75 Millionen Verdrängereinheiten pro Jahr.

2.2.7 Nutzung von Druckflüssigkeiten

Die Hydraulik ist eine Getriebetechnologie, in der die Leistungsübertragung über das Druckmedium, in der Regel mineral- oder bioölbasierte Flüssigkeiten, erfolgt. **Abbildung 18** zeigt den Schmierstoffverkauf in Deutschland im Jahr 2018. Hydraulikflüssigkeiten hatten mit 80.000 Tonnen einen Anteil von 8% der Menge (in Tonnen) am deutschen Schmierstoffverkauf im Jahr 2018. Davon waren 9% biogenen Ursprungs (N, 2018a).

Abbildung 18: Schmierstoffverkauf in Deutschland 2018



Quelle: BAFA Mineralölstatistik (N, 2018a), Darstellung IMM

Die Einteilung der Schmierstoffverkäufe in verschiedene Viskositätsklassen oder auf die fluidtechnischen Anwendungen ist nicht statistisch erfasst.

2.3 Zusammenfassung

Die Fluidtechnik ist eine Querschnittstechnologie, die in der überwiegenden Zahl der Unternehmen des produzierenden Gewerbes in unterschiedlichen Anwendungen zum Einsatz kommt; im mobilen Handwerkerkompressor ebenso wie im Schaufelradantrieb in Tagebaumaschinen.

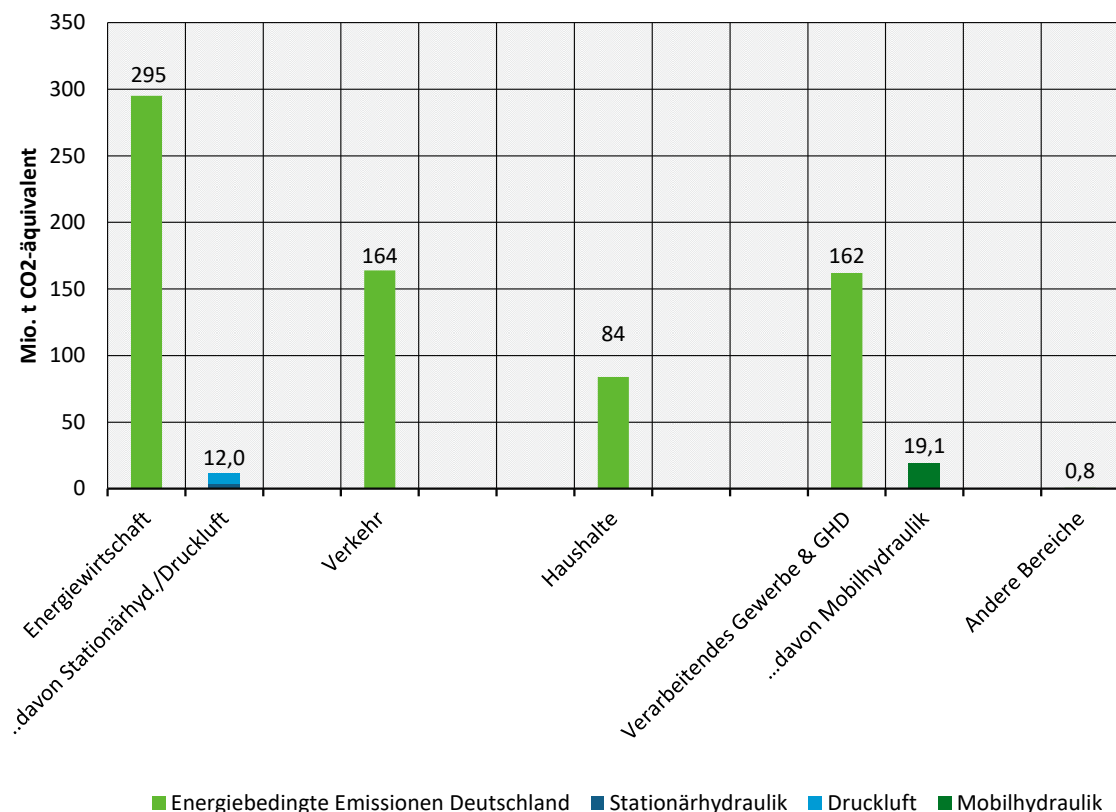
Es gibt keine repräsentativen Daten für die Anzahl fluidtechnischer Antriebe und der von ihnen umgesetzten Energie. Daher stützt sich diese Untersuchung für den wirtschaftlichen Aspekt auf Verkaufszahlen und Branchenumsätze und für den energetischen Aspekt auf verfügbare Hochrechnungen und Abschätzungen aus Sekundärquellen. So gelingt eine Abschätzung des Energiebedarfs der Maschinen und Anlagen, die in Deutschland mit fluidtechnischen Antrieben ausgestattet sind.

Wirtschaftlich kann die Bedeutung der Fluidtechnik-Branche zum einen an ihrem Umsatz gemessen werden, der im Jahr 2018 8,25 Mrd. Euro und damit 0,2% der gesamten deutschen Wirtschaftsleistung betrug. Die Fluidtechnik ist eine Zulieferbranche, deren Bedeutung sich auch am Umsatz der Kundenbranchen messen lässt, die 55% der Maschinenproduktion ausmachen.

Für die Erzeugung von Druckluft wird eine Elektroenergiemenge von 16 TWh von der AG Energiebilanzen als realistisch angenommen. Zusätzlich zu dieser Menge werden bis zu 20% der Druckluft von Turbokompressoren erzeugt, für die jedoch keine Daten vorliegen. Zuzüglich dieser Energiemenge ergeben sich 20 TWh. Bei Zugrundelegung des Deutschen Strommixes von 2019⁶ bedeutet dies einen CO₂-Ausstoß von 8 Mio. t, der wegen der Nutzung von Elektroenergie in **Abbildung 19** der Energiewirtschaft zugerechnet wird. Der Anteil der Pneumatik an dieser Menge wird auf 20%, also 1,6 Mio. t CO₂ pro Jahr geschätzt.

Die Hydraulik lässt sich in mit Diesel betriebene Maschinen (Mobilhydraulik) sowie nicht ortsveränderliche mit Elektromotoren angetriebene Maschinen (Stationärhydraulik) unterteilen. **Abbildung 19** zeigt die Aufteilung der Emissionen auf Sektoren und Branchen. Mobile Maschinen, im Wesentlichen Maschinen der Bau- und Landtechnik, benötigen ca. 54 TWh Energie. Von dieser Menge wird ein Anteil von 36 TWh in hydraulischen Antrieben umgesetzt. Der äquivalente CO₂ Ausstoß dieser Menge Diesel beträgt 19,1 Mio. t⁷.

Abbildung 19: Energiebedingte Emissionen* in Deutschland 2018, Anteil Fluidtechnik



*Kategorisierung nach Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz

Quelle: (Umweltbundesamt, 2020a), eigene Schätzungen, Darstellung: IMM

Hydraulikpumpen in der Stationärhydraulik setzen dieser Einschätzung zufolge eine Energiemenge unter 10 TWh pro Jahr um, was beim deutschen Strommix von 2019 einem CO₂-

⁶ CO₂-Emissionen des deutschen Inlandsstromverbrauchs 2019: 401 g/kWh (Umweltbundesamt, 2020b)

⁷ CO₂-Emissionen bei der Dieselerbrennung: 2,6 kg CO₂ pro Liter

Ausstoß von bis zu 4 Mio. t entspricht. Sämtlicher CO₂-Ausstoß bei der Erzeugung der Elektroenergie wird in dieser Statistik dem Energiesektor zugeordnet.

Die in dieser Studie vorgenommene erste Näherung des Energiebedarfs fluidtechnischer Antriebe zeigt, dass ein Energiebedarf von bis zu 66 TWh pro Jahr für die fluidtechnischen Antriebe realistisch sein kann. Das entspricht rechnerisch in etwa 2,5% des gesamtdeutschen Energiebedarfs.

Über den Bedarf an Primärenergie anhand des deutschen Strommixes in CO₂-Äquivalent umgerechnet, ergibt sich ein jährlicher CO₂-Ausstoß in Höhe von ca. 31 Mio. t CO₂.

Hydrauliköle haben einen signifikanten Anteil am Schmierstoffverkauf in Deutschland. Über Anteile verschiedener Viskositäten am Schmierstoffverkauf und ihr Einsatz in fluidtechnischen Anwendungen sind keine Informationen verfügbar.

3 Energieeinsparpotentiale

Eine wichtige Stoßrichtung bei der Weiterentwicklung einer Technologie ist die Energieeffizienz. Anreiz hierbei sind auf der regulativen Seite oft politische Vorgaben wie Abgasrichtlinien oder die Bepreisung des CO₂-Ausstoßes bzw. wirtschaftliche Überlegungen wie die Reduzierung der Energiekosten. Verstärkt sind auch rein ökologische Überlegungen oder gesellschaftliche Awareness Antrieb für die Verbesserung der Energieeffizienz.

Eine Steigerung der Energieeffizienz ist gleichbedeutend mit der Verbesserung des Systemwirkungsgrads oder der Minimierung von Verlusten. Die Potentiale können auf der Ebene einzelner Komponenten, von Subsystemen oder ganzer Maschinen und Anlagenverbünde durch strukturelle oder steuerungstechnische Anpassungen erschlossen werden. Über die Höhe der verfügbaren Energieeinsparpotentiale in Komponenten, Systemen sowie Maschinen und Anlagen der Fluidtechnik in Deutschland liegen keine Berechnungen vor. Wenige Studien betrachten die Teilgebiete der Druckluftherzeugung oder Pumpensysteme, von denen Hydraulikpumpen ein nach Stückzahlen geringerer Anteil sind.

Eichhammer und Fleiter (Eichhammer & Fleiter, 2012) schätzen ab, dass sich bei der Druckluftherzeugung durchschnittlich 33% und beim Pumpensystemen im Durchschnitt 20% Energie einsparen lassen. Die beiden Technologiegruppen machen nach ihrer Aussage zusammen 45% des insgesamt mit elektrischen Motorantrieben verknüpften Einsparpotentials aus. Keine der genannten Studien beschäftigt sich mit Hydraulikpumpen. Inwieweit diese als Untermenge der genannten Pumpen Berücksichtigung finden wird nicht genannt.

3.1 Methodik

Die Ermittlung von Einsparpotentialen im Bereich fluidtechnischer Antriebe lässt sich in den Bereichen Pneumatik (als Teilbereich der Drucklufttechnik), Stationär- und Mobilhydraulik in die Kategorien:

- ▶ steuerungs- und regelungstechnische Potentiale,
- ▶ Einsparpotentiale innerhalb der Technologie sowie
- ▶ Änderung der Technologie einteilen.

Die Maßnahmen werden in Kapitel 3.1 in die in Kapitel 2 abgegrenzten Technologiebereiche Stationärhydraulik, Mobilhydraulik und Drucklufttechnik (mit Anteil Pneumatik) sowie die Verwendung von Druckflüssigkeiten in der Hydraulik unterteilt. **Tabelle 8** zeigt die Clusterung der Untersuchungen. Es werden bei der Recherche nur Einsparungen berücksichtigt, die mindestens einen Entwicklungsstand des TRL 5 (Technology-Readyness-Level) nach DIN EN 16603-11 (N, 2020b) haben, das heißt über nachgewiesene Funktion in einem Demonstrator verfügen. Dies stellt die Realisierungsmöglichkeit in naher Zukunft sicher. Die identifizierten Einsparpotentiale sind dabei branchenspezifisch, lassen sich aber grundsätzlich für jede Branche über alle Größenordnung von Antrieben skalieren.

Tabelle 8: Ermittlung von Maßnahmen > TRL 5 nach Technologiebereichen

	Drucklufttechnik allgemein	Pneumatik	Hydraulik
Steuerungs- und Regelungstechnische Potentiale	Kompressoren	beschrieben in: (Agricola et al., 2005; EnEffAH -	Stationär- und Mobilhydraulik keine Luftfahrt

	Drucklufttechnik allgemein	Pneumatik	Hydraulik
Einsparpotentiale innerhalb der Technologie	Kompressoren, Aufbereitung Leitungsnetz,	Projektkonsortium, 2012a) beschrieben in: Agricola et al., 2005; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	Stationär- und Mobilhydraulik keine Luftfahrt
Änderung der Technologie	nicht betrachtet	in identifiziertem Bereich	in identifiziertem Bereich

Die Bereiche, in denen die Technologien Drucklufttechnik, Hydraulik und elektromechanische Linearantriebe miteinander konkurrieren, werden mit Marktrecherchen nach Kräften bzw. Leistungsdichte qualifiziert. Für diesen Bereich ist grundsätzlich eine Änderung der Technologie möglich, eine Substitution aber neben der technologischen Realisierbarkeit von weiteren Faktoren, insbesondere der Wirtschaftlichkeit abhängig. Hierzu werden in den folgenden Abschnitten qualitative Analysen der verfügbaren Potentiale durchgeführt. Dabei werden die Maßnahmen in zwei weitere Kategorien unterschieden: Solche, die für bereits im Betrieb befindliche Maschinen umgesetzt werden können, und die Gruppe der Maßnahmen, die bei der Konstruktion von Neuanlagen oder größeren Eingriffen in bestehende Anlagen umgesetzt werden können.

Die Technologiebereiche werden nach verschiedenen systematisch erschließbaren Potentialen geordnet und verschiedene Ansatzpunkte für die Verbesserung der Energieeffizienz aufgezeigt.

3.2 Einsparpotentiale in der Drucklufttechnik

Die Drucklufttechnik lässt sich aufgrund der Übertragung über zentrale Druckluftnetze in die Sektoren Druckluftbereitstellung (Erzeugung und Verteilung) sowie die Druckluftanwendung (Pneumatik, Vakuumtechnik und weitere Anwendungen). Effizienzpotentiale lassen sich in den genannten Bereichen einzeln und insbesondere durch eine Abstimmung aller Systemkomponenten aufeinander erreichen. Die Einsparpotentiale in der Drucklufttechnik wurden in den letzten Jahren mit Fokus auf die Pneumatik in umfangreichen mehrjährigen Forschungsarbeiten untersucht:

- ▶ Die Kampagne „Druckluft effizient“ wurde von 2001 bis 2004 von der Deutschen Energie-Agentur, dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem VDMA unter Beteiligung zahlreicher Industrieunternehmen durchgeführt (Agricola et al., 2005).
- ▶ In einem Verbundvorhaben „Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik - EnEffAH“ wurden von 2008 bis 2012 grundlegende Energiesparkonzepte und Anlagenoptimierungsverfahren für pneumatisch und elektrisch betriebene Antriebs- und Handhabungssysteme erarbeitet (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a).
- ▶ Im Verbundvorhaben „Anwenderorientierter Einsatz von energieeffizienter Antriebstechnik in der Produktion – EnAP“ werden Konzepte und Methoden erarbeitet um für bestimmte Bewegungsaufgaben die energetisch beste Lösung zu finden (Hülsmann et al., n.d.).

Im Rahmen dieser Studie werden die wesentlichen Potentiale aus den genannten, sowie weiteren, internationalen Studien (Dindorf, 2012; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001) verglichen, zusammengefasst und als Ergebnis für den Bilanzraum Deutschland ausgegeben.

Die betrachteten internationalen Studien weisen unterschiedliche Bilanzräume auf. So beziehen Radgen und Blaustein die Einsparpotentiale auf die Europäische Union zum Jahr 2001 (Radgen & Blaustein, 2001); McKane und Hasanbeigi beziehen sich auf die Europäische Union zum Jahr 2010 (McKane & Hasanbeigi, 2010); bei Dindorf ist der Bilanzraum nicht spezifiziert (Dindorf, 2012). Neuere Studien sind nicht bekannt.

Umfang und Bezugspunkte der Studien unterscheiden sich. Das Paper von Dindorf gibt lediglich eine Übersicht von Effizienzpotentials verschiedener Maßnahmen (Dindorf, 2012). Radgen und Blaustein, McKane und Hasanbeigi, sowie das ENEFFAH Projekt sind umfangreicher und beinhalten die jeweiligen Effizienzpotentials, Anwendbarkeit und resultierenden Einsparpotentials (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001). Die Studien weisen zudem Unterschiede in den Angaben der Effizienzpotentials auf. Radgen und Blaustein sowie McKane und Hasanbeigi beziehen das Effizienzpotential auf den Gesamtstrombedarf der Druckluft; Dindorf sowie das ENEFFAH Projekt bezieht sich auf den Verbrauch⁸ der betrachteten Komponente (Radgen & Blaustein, 2001), (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010). Bei Maßnahmen welche die Druckluftherzeugung betreffen sind beide Betrachtungsweisen identisch, große Unterschiede ergeben sich vor allem bei Maßnahmen im Bereich der Druckluftanwendungen.

3.2.1 Einsparpotentials in der Druckluftbereitstellung

Für die Berechnung des Energieeinsparpotentials der Druckluftbereitstellung in Deutschland wird nach einem Bottom-up Ansatz vorgegangen. Die Methodik ist in **Abbildung 20** dargestellt. Anhand einer Literaturanalyse werden die wichtigsten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in der Druckluftbereitstellung analysiert, zusammengefasst und einem der Bereiche „Steuerung und Regelung“, „Technologieupgrade“, oder „Dimensionierung“ zugeordnet. Im Rahmen der Analyse wurde festgestellt, dass Maßnahmen zur Leckagebeseitigung ein besonders großes Einsparpotential besitzen. Da sich diese Maßnahme nicht in die betrachteten Bereiche zuordnen lässt, wird sie gesondert betrachtet.

Die in dieser Studie angegebenen Einsparpotentials beziehen sich auf den Gesamtenergiebedarf der Druckluftbereitstellung in Deutschland und beschreiben nicht die Effizienz der Einzeltechnologie.⁹ Die Berechnung der Einsparpotentials erfolgt über die Verrechnung des Effizienzpotentials einer Maßnahme mit dessen Anwendbarkeit. Die Anwendbarkeit beschreibt in wie vielen Fällen die betrachtete Maßnahme umgesetzt werden kann.

Als Datengrundlage zur Ermittlung der relevanten Maßnahmen, sowie zur Bestimmung von Effizienzpotential und Anwendbarkeit dienen die drei oben genannten Studien sowie Veröffentlichungen von Radgen und Blaustein (Radgen & Blaustein, 2001), McKane & Hasanbeigi (McKane & Hasanbeigi, 2010) und Dindorf (Dindorf, 2012). Auf Grund von

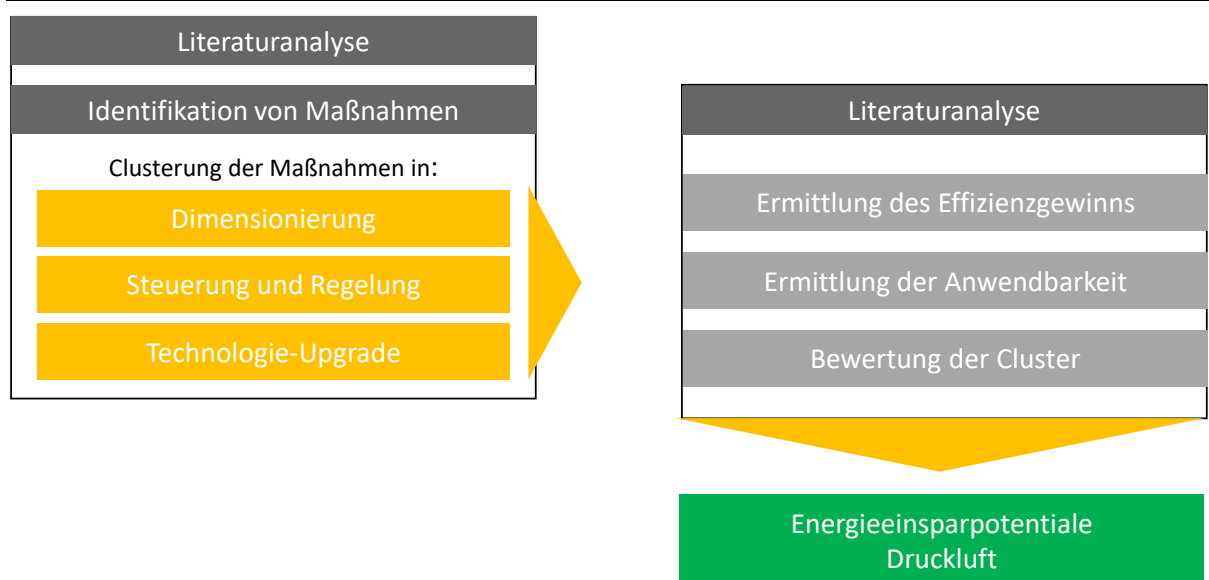
⁸ Im Projekt ENEFFAH wird als Bezugspunkt für die Effizienzangaben der Luftverbrauch der jeweiligen Komponente definiert. Es wird nicht erläutert, was der Bezugspunkt für Komponenten ohne Luftverbrauch (z.B. Kompressor, Kältetrockner, Druckluftnetz) ist. Es liegt nahe, dass der allgemeine Energiebedarf der Komponente verwendet wird.

⁹ Durch eine Maßnahme kann die Effizienz einer Komponente stark verbessert werden. Bei geringem Energiebedarf dieser Komponente ist das Effizienzpotential trotzdem klein. Das Effizienzpotential einer Maßnahme ist folglich nicht mit der Effizienz einer Maßnahme gleichzusetzen.

unterschiedlichen Bilanzräumen und Ausgangsbasen der Studien, existiert eine Streuung der publizierten Potentiale.

Die publizierten Projektergebnisse von ENEFFAH geben das Effizienzpotential zudem in der Form: „Einsparungen bis zu ...“ an, was tendenziell zu einer Überschätzung der Potentiale führt und die Spannbreite der Ergebnisse vergrößert. Die Spanne der Literaturdaten ist im jeweiligen Text aufgeführt.

Abbildung 20: Methodik zur Ermittlung der Energieeinsparpotentiale in der Druckluftbereitstellung in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung IER

3.2.1.1 Einsparpotentiale im Bereich „Steuerung und Regelung“ der Druckluftbereitstellung

In den Bereich „Steuerung und Regelung“ fallen Steuerungs- und Regelungskonzepte von Kompressoren und Aufbereitungstechnik. Die größten Einsparpotentiale können durch die Maßnahmen:

- ▶ Einsatz von drehzahlgeregelten Kompressoren,
- ▶ Einsatz übergeordneter Kompressorsteuerungen und
- ▶ Netzdruckabsenkung realisiert werden.

Eine Übersicht der einzelnen Potentiale ist in **Tabelle 9** enthalten. Die Maßnahme Netzdruckabsenkung bietet eine große Anwendbarkeit bei geringem finanziellen Aufwand. Hierbei wird der Solldruck im Druckluftnetz herabgesetzt, wodurch der Energieaufwand für die Verdichtung sinkt. Eine Druckabsenkung von 1 bar führt zu Einsparungen von circa 8% im Strombedarf. In der Literatur wird das gesamte Effizienzpotential von Netzdruckabsenkungen mit 3 bis 15% angegeben (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; Radgen & Blaustein, 2001).

Durch den Einsatz von übergeordneten Steuerungen kann ein Kompressorverbund deutlich effizienter betrieben werden. Übergeordnete Steuerungen schalten je nach Bedarf Kompressoren zu oder ab und sorgen für möglichst geringe Leerlaufzeiten der Kompressoren. In vielen Fällen wird durch den Einsatz eine weitere Netzdruckabsenkung möglich. Das durchschnittliche Effizienzpotential wird in der Literatur mit 8 bis 20% angegeben (Dindorf,

2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001). Der Einsatz von drehzahlvariablen Kompressoren weist ein hohes durchschnittliches Effizienzpotential von 15% auf, da hierdurch die in der Praxis häufig schwankenden Druckluftbedarfsmengen variabel bereitgestellt werden können. Hierdurch können ineffiziente Start-Stopp Vorgänge und Leerlaufzeiten, bei gleichzeitiger Stabilisierung des Netzdrucks, minimiert werden. (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001)

Das gesamte Einsparpotential des Bereichs „Steuerung und Regelung“ liegt zwischen 8 und 16% des Gesamtstrombedarfs der Druckluftbereitstellung. Auf Grund der eingangs erwähnten Überschätzung der Effizienzpotentiale im ENEFFAH Projekt durch die Angabe von Maximaleffizienzen, ist das Einsparpotential vermutlich eher im unteren Bereich der angegebenen Bandbreite zu erwarten. Die Maßnahme Netzdruckabsenkung ist nahezu ohne Investitionen umsetzbar, scheitert jedoch häufig an Bedenken der Betriebssicherheit und/oder falsch dimensionierten Komponenten.

Tabelle 9: Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Steuerung und Regelung“

Studie	Effizienzpotential [%]				Anwendbarkeit [%]				Einsparpotential [%]			
	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)
Drehzahlregelung	15	15	15	15	25	25	20	-	4	4	3	-
übergeordnete Steuerung	12	20	8	-	20	20	51	-	2	4	4	-
Netzdruckabsenkung	3	15	7	8	50	50	29	-	2	8	2	-
Summe der Einsparpotentiale									8	16	9	-

Quelle: (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001)

3.2.1.2 Einsparpotentiale im Bereich „Technologieupgrade“

In den Bereich „Technologieupgrade“ fallen Neuanschaffungen von Komponenten, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Die größten Einsparpotentiale können durch die Maßnahmen:

- ▶ Installation von Wärmerückgewinnungssystemen,
- ▶ Austausch von Kompressoren und

- ▶ Austausch von Drucklufttrocknern realisiert werden.

Eine Übersicht der einzelnen Potentiale ist in **Tabelle 10** enthalten. Der Kältetrockner ist das am häufigsten eingesetzte Drucklufttrocknungsverfahren, es benötigt im Vergleich zur Druckluftherzeugung nur einen geringen Energiebedarf. Dennoch werden in diesem Bereich viele veraltete Bauweisen und Regelungen verwendet. Die Möglichkeit des Trockneraustauschs wird in der Literatur mit 10 – 60% angegeben, wobei sich die geringen Zahlen vor allem auf Sorptionstrockner beziehen. Das Effizienzpotential (bezogen auf den Gesamtbedarf der Druckluftbereitstellung) verhält sich gegenläufig. Einfache und/oder ältere Kältetrockner besitzen einen Heißgasbypass im Kältekreislauf zur Regelung der Trocknungsleistung. Diese Regelungsart benötigt im Teillastfall¹⁰ nahezu den gleichen Strombedarf wie im Maximalbetrieb. Neue Anlagen besitzen hier elektronische Regelungen. Der Austausch von ineffizienten Kältetrocknern führt zu einer deutlichen Effizienzsteigerung. Der Strombedarf eines einzelnen Kältetrockners ist jedoch relativ gering, weshalb hier nur Effizienzpotentiale von 2 bis 5% existieren (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001).

Die Effizienzsteigerung bei neuen Kompressoren ist maßgeblich auf drei Aspekte zurückzuführen: Den Einsatz von effizienteren Antriebsmotoren (z.B. IE4), den Wegfall von Getriebeverlusten durch Umstellung auf einen Direktantrieb sowie durch die Optimierung des Verdichterblocks. Das Effizienzpotential wird in der Literatur mit 7% angegeben (Dindorf, 2012; Radgen & Blaustein, 2001).

Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung senken den Energiebedarf der Druckluftbereitstellung nicht, da es sich lediglich um eine Nutzung der entstehenden Abwärme handelt. Wird als Bilanzraum z.B. das gesamte Unternehmen gewählt, führen die Maßnahmen dennoch zu Energieeinsparungen, da üblicherweise Brennstoffe zur Wärmebereitstellung ersetzt werden. Zudem führt die Wärmerückgewinnung nur dann zu Einsparungen, wenn ein tatsächlicher Wärmebedarf auf passendem Temperaturniveau besteht. Oftmals werden bei Wärmerückgewinnungsanlagen Einsparungen von bis zu 96% angegeben, diese Einsparungen sind jedoch nur mit Luftwärmeübertragern und einem geringen Temperaturniveau von 35°C möglich. Zusätzlich muss der Bedarf ganzjährig vorliegen, um dieser Rechnung zu entsprechen. In der Praxis liegt das Effizienzpotential folglich deutlich niedriger (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; Radgen & Blaustein, 2001).

Das gesamte Einsparpotential des Bereichs „Technologieupgrade“ liegt zwischen 7 und 49% des Gesamtstrombedarfs der Druckluftbereitstellung. Im Fall der Wärmerückgewinnung wird angenommen, dass durch Strom erzeugte Wärme substituiert wird, andernfalls sinkt das Einsparpotential auf den Bereich von 1 bis 3%; zusätzlich würde jedoch eine Brennstoffeinsparung existieren.

¹⁰ Kältetrockner werden fast das ganze Jahr in Teillast betrieben, da die Auslegung des Trockners auf einem heißen feuchten Tag basiert.

Tabelle 10: Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Technologieupgrade“

Studie	Effizienzpotential [%]				Anwendbarkeit [%]				Einsparpotential [%]			
	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)
Wärmerückgewinnung	20	96	-	60	20	50	-	-	4	48	-	-
Kompressoraustausch	7	-	-	7	30	-	-	-	2	-	-	-
Trockneraustausch	5	2	-	-	10	60	-	-	1	1	-	-
Summe der Einsparpotentiale									7	49	-	-

Quelle: (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001)

3.2.1.3 Einsparpotentiale im Bereich „Dimensionierung“

In den Bereich „Dimensionierung“ fallen Maßnahmen zur bedarfsgerechten Dimensionierung aller Komponenten eines Druckluftsystems. Die größten Einsparpotentiale können durch die Maßnahmen:

- ▶ Dimensionierung von Kompressoren,
- ▶ Dimensionierung von Aufbereitungskomponenten und
- ▶ Dimensionierung von Druckluftnetzen realisiert werden.

Eine Übersicht der einzelnen Potentiale ist in **Tabelle 11** enthalten. Das Druckluftnetz ist in vielen Fällen unterdimensioniert. Es sind zu kleine Leistungsquerschnitte verbaut, Vermaschungen des Netzes fehlen und ggf. existieren kritische Stellen an denen zu wenig Luft ankommt. Nicht ausreichend dimensionierte Druckluftnetze weisen meist erhöhte Druckverluste auf und müssen bei deutlich erhöhten Netzdrücken betrieben werden. In den meisten Fällen ist eine Änderung des Druckluftnetzes mit großem Aufwand verbunden. Einfachere Maßnahmen umfassen das Schließen des Druckluftnetzes zu einer Ringleitung und das Aufstellen von zusätzlichen Druckluftspeichern an kritischen Stellen. Das Effizienzpotential wird in der Literatur mit 5 bis 10% angegeben (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001).

Die bedarfsgerechte Dimensionierung der Druckluftaufbereitung steht im engen Zusammenhang mit der Definition der Druckluftqualität nach ISO 8573. In einigen Fällen wird die Druckluft unnötig hoch aufbereitet und dadurch der Energiebedarf gesteigert. Teilweise kann eine

dezentrale Aufbereitung der Druckluft vor besonders kritischen Einzelanwendungen sinnvoll sein, da nur eine Teilmenge der Druckluft stark aufbereitet wird. In der Literatur sind Effizienzpotentiale von 6 bis 10% zu finden (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010).

Die korrekte Dimensionierung von Druckluftkompressoren ist entscheidend für den effizienten Betrieb einer Druckluftversorgung. Durch Unterdimensionierung ist die Versorgungssicherheit des Betriebs mit Druckluft nicht gegeben, durch Überdimensionierung kommt es zu einem erhöhten Energiebedarf. Folgen einer Überdimensionierung sind z.B. große Leerlaufanteile von Kompressoren oder der dauerhafte Betrieb von drehzahlgeregelten Anlagen in ineffizienten Betriebspunkten. Die Maßnahme lässt sich schätzungsweise in 50% der Anlagen anwenden (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001).

Das gesamte Einsparpotential des Bereichs „Dimensionierung“ liegt im Bereich von 4 bis 5% des Gesamtstrombedarfs der Druckluftbereitstellung.

Tabelle 11: Einsparpotential, Anwendbarkeit und Effizienzpotential von Maßnahmen des Bereichs „Dimensionierung“

Studie	Effizienzpotential [%]				Anwendbarkeit [%]				Einsparpotential [%]			
	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)	(Radgen & Blaustein, 2001)	(EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a)	(McKane & Hasanbeigi, 2010)	(Dindorf, 2012)
Dimensionierung Kompressor	9	-	13	-	50	-	17	-	5	-	2	-
Dimensionierung Aufbereitung	-	10	6	6	-	20	22	-	-	2	1	-
Dimensionierung Netz	-	10	10	12	-	20	15	-	-	2	2	-
Summe der Einsparpotentiale	-	-	-	-	-	-	-	-	5	4	5	-

Quelle: (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001)

3.2.1.4 Einsparpotentiale durch Leckagebeseitigung

Die Identifikation und Beseitigung von Druckluftleckagen ist die Einzelmaßnahme mit dem größten Einsparpotential. Leckagen in Druckluftsystemen sind unvermeidbar. Bei einem Leckageanteil von kleiner 10 % gilt das System als sehr gut gewartet. Im Durchschnitt sind die Leckageanteile deutlich höher und liegen nach der Einschätzung der Autoren bei 20 – 30%. In der Literatur wird das Effizienzpotential mit 10 bis 20% angegeben, bei gleichzeitig hoher Anwendbarkeit von 60 bis 80 %. Das Einsparpotential liegt je nach Studie bei 9 bis 16%. Das

größte Einsparpotential ist in der Studie aus 2001 von Radgen und Blaustein mit 16% angegeben. Durch die Adressierung der Energieverschwendung von Druckluftleckagen, ist dieser Wert heutzutage wahrscheinlich zu hoch angesetzt, es gilt jedoch zu beachten, dass Druckluftleckagen ein wiederkehrendes Problem sind und kontinuierlich adressiert werden müssen. (Dindorf, 2012; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a; McKane & Hasanbeigi, 2010; Radgen & Blaustein, 2001)

3.2.1.5 Gesamteinsparpotential der Druckluftbereitstellung

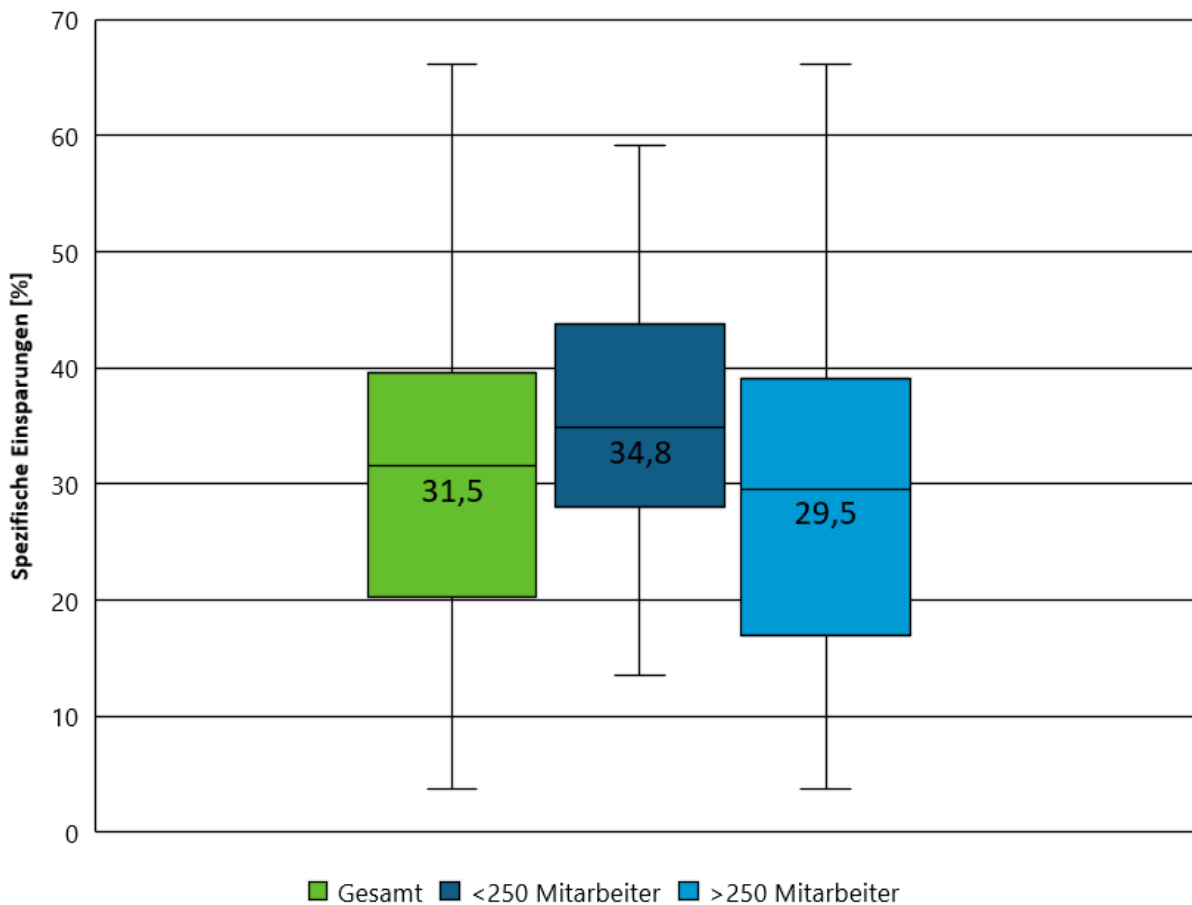
Das Gesamteinsparpotential ist nicht gleich der Summe der Einzelpotentiale der vorgestellten Maßnahmenkategorien zuzüglich der Maßnahme zum Thema Leckagebeseitigung. Da sich das Einsparpotential der Maßnahmen auf den Gesamtstrombedarf bezieht, verringert sich das Potential. Die Spannbreite des Gesamteinsparpotentials ergibt sich zu 20 bis 35% des Gesamtstrombedarfs der Druckluftbereitstellung. Auf Grund der erschwerten Bedingungen zur Berücksichtigung der Nutzung von Wärmerückgewinnungssystemen ist das Einsparpotential nicht in dem Gesamteinsparpotential enthalten.¹¹ Bei einem Strombedarf der Druckluftbereitstellung von 16 TWh/a entspricht das einem Gesamteinsparpotential von 3,2 bis 5,6 TWh/a, bzw. einer Einsparung von 1,3 bis 2,3 Mio. t CO₂.

In diesem Gesamtpotential sind noch keine Wechselwirkungen der Maßnahmen berücksichtigt. Eine solche Wechselwirkung könnte beispielweise sein, dass durch die Vermeidung von Leckagen der Volumenstrom so stark gesenkt wird, dass eine Redimensionierung des Druckluftnetzes nicht mehr notwendig ist.

Eine Aufschlüsselung der Effizienzpotentiale nach Branchen ist auf Grund der Datenlage nicht möglich. Durch den Querschnittscharakter der Drucklufttechnik werden jedoch nur geringe Abweichungen innerhalb der Branchen vermutet.

Im Verlauf der Kampagne „Druckluft effizient“ wurde eine Messkampagne zur Identifikation des Einsparpotentials in Unternehmen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 21** als Boxplot dargestellt. Die Höhe der Box zeigt den Bereich, in dem 50% der Ergebnisse liegen, der Median ist als horizontale Linie dargestellt. Die senkrechten Linien (Streubalken) geben den Bereich aller Ergebniswerte an. Die Auswertung der 65 Unternehmen ergibt einen Median des Einsparpotentials in der Druckluft von 31,5%. Die Auswertungen zeigen, dass das Einsparpotential mit steigender Unternehmensgröße sinkt. Die ermittelten individuellen Einsparpotentiale sind jedoch stark vom Einzelfall abhängig, was sich an der großen Bandbreite der ermittelten Potentiale zeigt. Die Kampagne wertete auch die Leckageanteile der untersuchten Branchen aus und konnte hier große Unterschiede aufzeigen. So schwanken die ermittelten Leckageanteile je nach Branche zwischen 15 und 60%. Die Kampagne fand von 2001 bis 2004 statt (Agricola et al., 2005).

¹¹ Die Wärmerückgewinnung an Druckluftkompressoren verändert den Strombedarf der Druckluftbereitstellung nicht, sondern substituiert im Regelfall Brennstoff für die Wärmebereitstellung.

Abbildung 21: Spezifisches Einsparpotential in Abhängigkeit der Unternehmensgröße auf Basis von 65 auditierten Unternehmen

Quelle: (Agricola et al., 2005), Darstellung: IER

3.2.2 Potentiale in Druckluftanwendungen

Durch die universelle Einsetzbarkeit von Druckluft existiert eine große Anzahl von Druckluftanwendungen. Die Anwendungen in sich weisen Potentiale zur Senkung des Luftverbrauchs auf. Dieses Kapitel stellt die Einsparpotentiale in der Vakuumtechnik, sowie der Pneumatik dar.

3.2.2.1 Vakuumtechnik

Die Vakuumtechnik stellt ein Teilgebiet der Pneumatik dar. Die Grundlagen der Vakuumtechnik sind in Abschnitt 2.1.3 erläutert. Eine exakte Höhe des Energieeinsparpotentials in der Vakuumtechnik lässt sich auf Grund der schlechten Datenlage nicht angeben. Einsparungen gegenüber dem aktuellen Stand lassen sich vor allem durch folgende Maßnahmen realisieren:

- ▶ Einsatz von Luftsparschaltungen,
- ▶ Einsatz von mehrstufigen Ejektoren sowie
- ▶ bedarfsgerechte Dimensionierung der Vakuumkomponenten.

Ejektoren mit Luftsparschaltung besitzen ein Absperrventil, welches die Saugleitung bei erreichtem Solldruck sperrt, um das Vakuum ohne weitere Luftzufuhr aufrecht zu erhalten. Je nach Arbeitszyklus sind im Vergleich zu herkömmlichen Ejektoren Einsparungen von 75%

möglich (N, 2020c). Beim Handling von porösen Werkstoffen sinkt das Einsparpotential ab bzw. ist nicht mehr vorhanden.

Mehrstufige Ejektoren haben durch die mehrfache Entspannung einen geringeren spezifischen Luftverbrauch als einstufige Ejektoren. Die Evakuierungszeit steigt jedoch bei niedrigeren Absolutdrücken an und mindert die Einsparung. Aus technischen Datenblättern von einstufigen und mehrstufigen Ejektoren ergeben sich verringerte, spezifische Luftverbräuche von 30 bis 60% (Schmalz, 2020).

Die Dimensionierung von Vakuumpkomponenten hat einen großen Einfluss auf die Effizienz im Betrieb. Positiv auf die Effizienz wirken kurze Leitungen und geringe Schlauchdurchmesser, wobei es sich hier stets um eine Optimierung zwischen Totvolumen und Druckverlust handelt. Je dichter das angesaugte Werkstück ist, desto größer ist die Bedeutung des Totvolumens. In der Handhabungstechnik lässt sich beispielsweise durch eine passende Auswahl des Saugnapfes das benötigte Vakuumniveau senken und Energie einsparen (Tuohey, 2016).

3.2.2.2 Pneumatik-Anwendungen

Die in pneumatischen Antriebssystemen existierenden Energieeinsparpotentiale können durch Nachrüstung von Komponenten und/oder Steuerungstechnik erschlossen werden. Zu den Effizienzpotentialen in der Pneumatik sind in der Vergangenheit zahlreiche Forschungsvorhaben durchgeführt worden. Eine umfassende Übersicht der größten Einsparpotentiale in den Komponenten der pneumatischen Handhabungstechnik wurden im Projekt EnEffAH erarbeitet und mit der Abschätzung ihrer möglichen Potentiale in (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012a) veröffentlicht. In **Tabelle 12** sind die dort erarbeiteten Maßnahmen mit dem größten Einsparpotential aufgeführt.

Tabelle 12: Maßnahmen und Einsparpotentiale in der Pneumatik

Maßnahme	Einsparung bis zu	Anwendbarkeit
korrekte Auslegung von Antrieben und Komponenten	40%	80%
Vermeidung von Totvolumina	20%	30%
Leckageortung und -beseitigung	20%	70%
Einsatz einfach wirkender Zylinder	50%	10%
Kurzschlussventile einsetzen	43%	10%
Zuluftdrosselung/ gezieltes Abschalten	50%	30%
optimierte Ventilansteuerung	65%	30%

Quelle: (EnEffAH - Projektkonsortium, 2012b)

Besonders große Potentiale liegen in der Wahl der richtigen Schaltungsarchitektur, ihrer richtigen Dimensionierung und der Ansteuerung. Hepke untersucht Pneumatikschaltungen für typische Handhabungsaufgaben (Hepke, 2017). Er zeigt, dass insbesondere in der getrennten Steuerung von Zu- und Abluft sowie der Nutzung der kinematischen Energie der Aufgaben erhebliches Einsparpotential verglichen mit den heute standardmäßig eingesetzten Schaltungen besteht.

3.3 Einsparpotentiale in der Stationärhydraulik

Die Betrachtung von Einsparpotentialen erfolgt entlang des Antriebsstrangs. Dabei wird zwischen kurzfristigen Potentialen, die durch die Nachrüstung von Komponenten oder

Steuerungstechnik erschlossen werden können und Potentialen in der Konstruktion, die in der Regel nur längerfristig mit der Neuanschaffung einer Anlage erschlossen werden können, unterschieden.

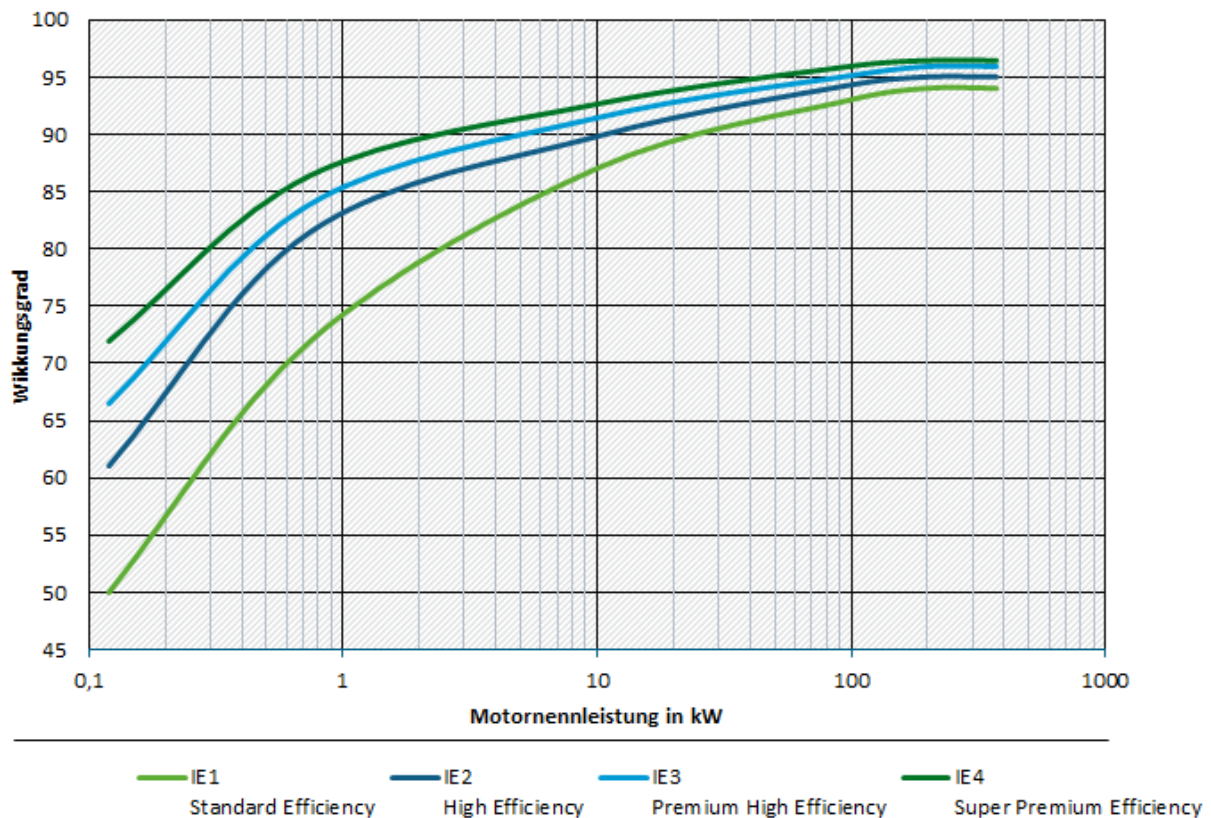
3.3.1 Komponenten-Update

Bei vielen Hydraulikanwendungen kommen Standard-Asynchronmotoren mit Leistungen zwischen 10 und 100 kW zum Einsatz.

Die Lebensdauer von Maschinen und Anlagen in der Stationärhydraulik übersteigt häufig die Einsatzdauer der Komponenten. Die Mindestwirkungsgrade von Niederspannungs-Elektromotoren sind nach IEC60034-30 in Europa und in den USA durch die EISA-Norm geregelt. Der Ersatz funktionstüchtiger Normmotoren durch Motoren höherer Effizienz lohnt sich insbesondere beim Umstieg von IE1 Motoren, wenn der Motor im Dauerbetrieb läuft (**Abbildung 22**). Für neue Elektromotoren gilt ab Juli 2021 die Verordnung (EU) 2019/1781, die Energieeffizianz Anforderungen vorschreibt (Verordnung (EU) 2019/1781 Der Kommission Vom 1.Oktober 2019, 2019).

Abbildung 22: Standards für Motoren Mindestwirkungsgrade IEC 60034-30

Beispiel: Standard-Asynchronmaschinen 0,15-400 kW, 4-polig, 1500 U/min, 50 Hz nach IEC 60034-30



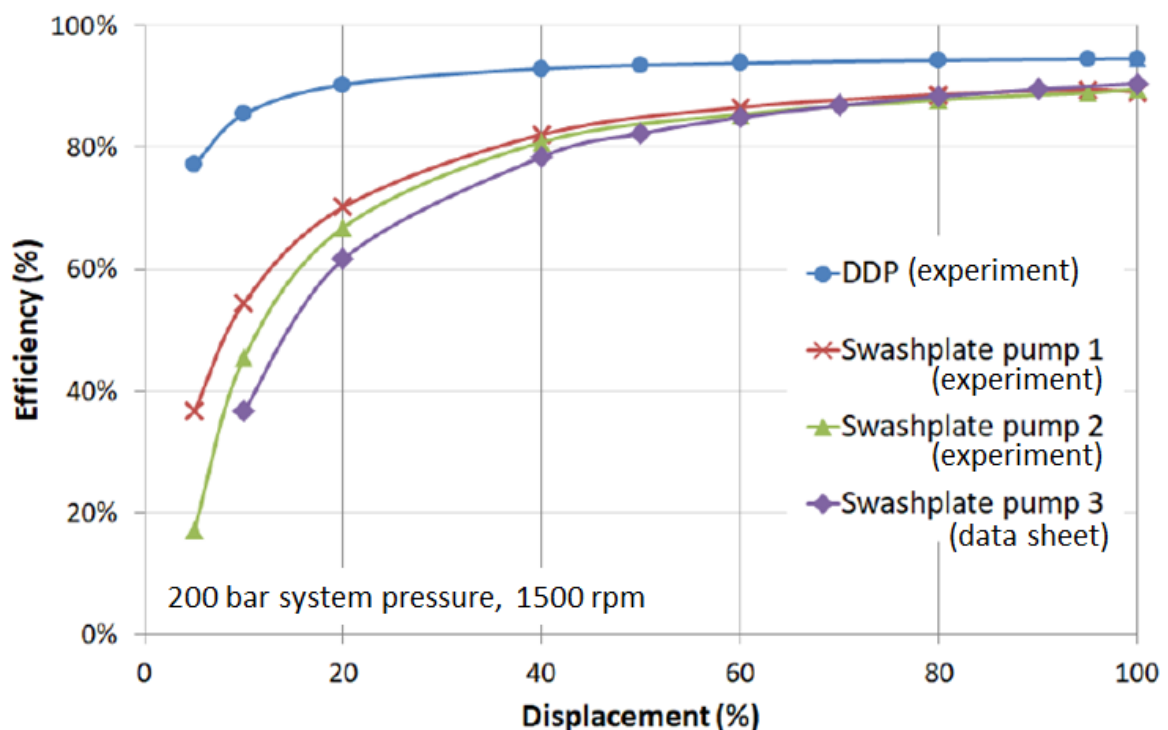
Quelle: Eigene Darstellung IMM nach (DIN EN 60034-30-1, 2014)

Weitere Effizienzsteigerungen könnend durch den Umstieg auf bedarfsgerechte Energiebereitstellung erfolgen. Der Einsatz drehzahlvariabler Pumpenantriebe (Servopumpen) erlaubt eine genaue Dosierung des Volumenstroms und eine Abschaltung bereits in kurzen Stillstandszeiten. Dabei haben drehzahlvariabel betriebene Asynchronmotoren im niedrigen Drehzahlbereich einen geringen Wirkungsgrad. Für dynamische Antriebe kann die Kombination

von drehzahlvariablen Antrieben mit Verstellpumpen einen zusätzlichen Freiheitsgrad ermöglichen, mit dem Dynamik und Energieeffizienz positiv beeinflusst werden können. Eine Umstellung auf Servopumpenantriebe ist in der Regel als Nachrüstung möglich.

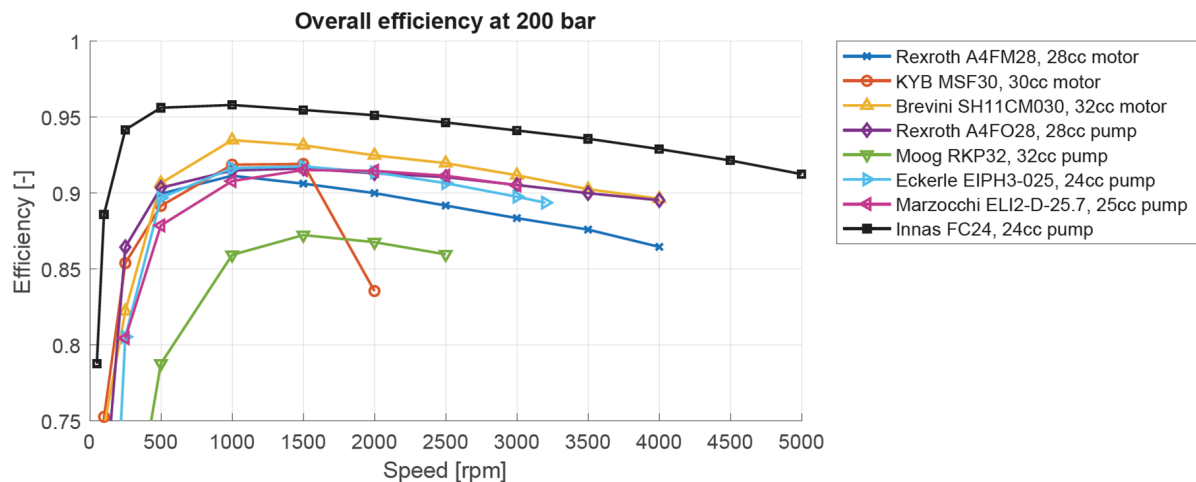
Im Gegensatz zu herkömmlichen Zahnrad oder Axialkolbenpumpen in Schrägscheiben- (swashplate) oder Schrägachsenbauweise (bent-axis) weisen neue Pumpenkonzepte wie das Floating-Cup Prinzip (Achten et al., 2004; Achten, 2015), oder Digitalpumpenkonzepte (Caldwell, 2018; Reinertz & Schmitz, 2019), bei dem einzelne Verdrängerräume der Pumpe individuell geschaltet werden können höhere Wirkungsgrade auch bei niedrigen Drehzahlen auf. Green weist im Feldversuch in einem Bagger einen signifikant besseren Wirkungsgrad bei einer Standard-Drehzahl von 1500 U/min im Vergleich mit herkömmlichen Pumpenprinzipien bei 200 bar Druck nach (Green et al., 2018).

Abbildung 23: Vergleich einer Digital-Displacement-Pumpe mit verschiedenen Axialkolbenpumpen



Quelle: (Green et al., 2018), Legende erweitert IMM

Innas zeigt anhand von ausführlichen Messungen verschiedener marktüblicher Einheiten im Baugrößenbereich zwischen 24 und 32 ccm deutliche Wirkungsgradunterschiede verschiedener Pumpenkonzepte auf (Innas BV, 2020). Die untersuchten Axialkolbeneinheiten weisen dabei in einem großen Betriebsbereich Wirkungsgrade von über 90 Prozent, teilweise über 95 Prozent (floating-cup-Konzept) auf. Die Untersuchungen zeigen, dass verschiedene Pumpenkonzepte sich in Abhängigkeit von Druck und Drehzahl in der Energieeffizienz deutlich unterscheiden können.

Abbildung 24: Wirkungsgradkennfelder von ausgewählten Verdrängereinheiten im Vergleich

Quelle: (Innas BV, 2020)

3.3.2 Steuerungstechnik-Update

Leistungsreduzierung und Stillsetzung. In vielen Produktionsprozessen sind große Einsparpotentiale durch temporäre Abschaltung oder Reduzierung der Leistung einzelner Komponenten oder ganzer Anlagenteile möglich.

Energie-Management. Am Beispiel einer Stanzeinrichtung kann der Effekt einer Vergleichmäßigung gezeigt werden: Die maximale Leistungsaufnahme eines elektromechanischen Antriebs reduziert sich in diesem Fall um 58%, allein durch die Zwischenspeicherung elektrischer Energie mittels im DC-Zwischenkreis installierter Kondensatorbatterien (Ristic & Wahler, 2018).

3.3.3 Update von Antriebssystemen - Modernisierung der Architektur

Zahlreiche hydraulische Systeme nutzen den Vorteil des parallelen Betriebs mehrerer Aktoren an einem Netz. Die zentrale Druckversorgung hat technologisch Vorteile, ist jedoch energetisch nicht optimal, da prinzipbedingt der vom Aktor nicht benötigte Druck im Steuerelement, z.B. einem Ventil abgebaut werden muss (Drosselsteuerung). Bei Vorliegen der technischen Voraussetzungen kann eine bedarfsgerechte Versorgung von Aktoren erfolgen. Hierfür wird von der Motor-Pumpe-Einheit nur der am Aktor benötigte Volumenstrom bereitgestellt. In Phasen in denen keine Energie benötigt wird, kann der Antriebsmotor stillgesetzt werden. Eine Weiterentwicklung verdrängergesteuerter Systemarchitekturen sind autarke Elektrohydraulische Achsen (EHA). Es handelt sich dabei um autarke abgeschlossene Antriebsachsen, die nach dem Vorbild elektromechanischer Linearantriebe eingangsseitig nur elektrisch angeschlossen werden, ohne die Vorzüge der Hydraulik zu verlieren.

Beispiel Verdrängersteuerungen mit variabler Drehzahl. Willkomm zeigt, dass sich der durch die Kombination von drehzahlvariablen Motoren mit Verstellpumpen gewonnene Freiheitsgrad für die Verbesserung der Energieeffizienz oder der Dynamik nutzen lässt (Willkomm, 2016; Willkomm et al., 2014). Er erzielt 15% Effizienzsteigerungen in dynamischen Anwendungen durch die Reduzierung von Beschleunigungsvorgängen. Die Steigerung der Dynamik liegt im Bereich bis zu 50% gegenüber herkömmlichen Verstellpumpensystemen. Hochdynamische Anwendungen, die meist ventilgesteuert betrieben werden, können mit dieser Architektur auch mit effizienten Verdrängersteuerungen betrieben werden.

Beispiel Hybridisierung. Hydraulische Tiefziehpressen sind Serienanwendungen, die große Kräfte aufbringen und Leistungen im Megawatt-Bereich umsetzen. Nahezu alle Pressen am Markt arbeiten mit ventilgesteuerten Ziehkissen, die dazu dienen, das umzuformende Teil mit definierter Kraft einzuspannen. Lohse weist mit der Umrüstung einer marktüblichen Presse nach, dass mit dem Einsatz einer Verdrängersteuerung im Ziehkissen Energieeinsparungen von 30% bei hydraulischen Tiefziehpressen möglich sind (Lohse et al., 2015a) Durch den Ersatz mit verdrängergesteuerten Antrieben kann Energie rekuperiert und dem Stößel zur Verfügung gestellt werden, unabhängig davon, ob die Presse als elektromechanische Servopresse oder als hydraulische Presse ausgeführt ist. Juristisch ungeklärt ist, ob die aktuelle Patentsituation (Kohno & Somukawa, 2014) einen Einsatz dieser Technologie vor dem Jahr 2026 ermöglicht.

Beispiel Elektrohydraulische Kompaktachsen. Michel führt einen Vergleich einer elektrohydraulischen Kompaktachsen (EHA) mit einer elektromechanischen Kompaktachse gleicher Leistung im Leistungsbereich < 5kW durch und vergleicht die Wirkungsgrade im Nennbetrieb (Michel & Weber, 2012). Er weist an zwei Demonstratoren nach, dass der maximale Wirkungsgrad der Systeme nicht wesentlich voneinander abweicht. EHA Systeme sind in den letzten Jahren zur Marktreife gebracht worden und heute kommerziell bei vielen Herstellern verfügbar.

3.3.4 Ganzheitliche Systemoptimierung

Verluste bei der Energieübertragung sind eine häufige Ursache für Energieverluste in hydraulischen Systemen. Durch die Notwendigkeit einer Kühlung des Druckmediums reduzieren Wärmeverluste die Energieeffizienz zusätzlich zum eigentlichen Energieverlust. Häufig auftretende Ursachen sind Strömungsverluste durch geringe Leitungsquerschnitte oder häufige Umlenkungen; zu lange Leitungen; zu hoch gewählte Druckniveaus oder der Anschluss von Verbrauchern mit unterschiedlichen Betriebsdrücken an einem zentralen Netz. Durch Systematisierung der Auslegung lassen sich Energieeinsparungen realisieren.

3.4 Einsparpotentiale in der Mobilhydraulik

Mobilhydraulische Maschinen sind in der Regel dieselmotorisch angetrieben. Kabelgebundene Anwendungen sind beispielsweise im Hafenumschlag zu finden und stellen einen sehr kleinen Anteil der Maschinen die hier nicht näher betrachtet werden.

Energieeffizienzpotentiale

Mit 61% wird über die Hälfte des durch mobile Baumaschinen verbrauchten Kraftstoffs in Hydraulikbaggern und Radladern gewandelt (Helmus & Fecke, 2015), weshalb diese Klasse im Fokus der Betrachtungen bei der Untersuchung der Einsparpotentiale steht.

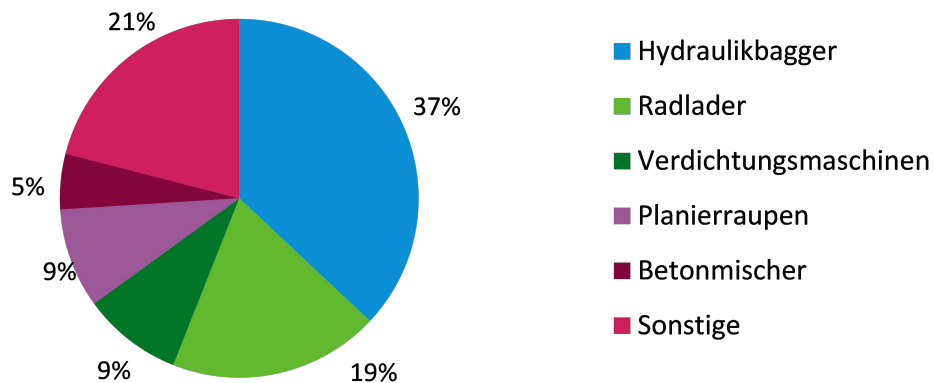
Im Unterschied zu stationären Anwendungen sind mobilhydraulische Maschinen Serienfahrzeuge mit breitem Anwendungs- und Einsatzspektrum, bei denen eine sehr hohe Komponenten- und Systemvarianz anzutreffen ist. Mobile Maschinen sind heute fast ausschließlich bedienergeführt. Energieeffizienzpotentiale können somit in der Maschinenkonstruktion, durch eine entsprechend angepasste Maschinenbedienung oder übergeordnete Energiemanagementsysteme erschlossen werden.

3.4.1 Energieeffizienzpotentiale durch Bediener*innen

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung des Energiebedarfs mobiler Maschinen sind die Leerlaufzeiten in denen pro Zeiteinheit durch die Versorgung der Nebenverbraucher mehr als 50% des durchschnittlichen Kraftstoffbedarfs im Lastbetrieb auftreten (Fecke, 2018).

Abbildung 25 zeigt den Anteil der Leerlaufzeiten an den Nutzungszeiten der Maschinen am Beispiel der Bagger und Radlader. Eine Reduzierung der Leerlaufzeiten ist eine der effektivsten Möglichkeiten den Energiebedarf aller Maschinen im Bestand zu reduzieren, betrifft jedoch nicht direkt die Maschinenentwicklung.

Abbildung 25: Betriebszeiten und Kraftstoffverbrauch verschiedener mobiler Maschinen



	Stunden - Leerlauf	Stunden - Last	Leerlaufanteil
Mobilbagger	73.724	1.652.912	4,5%
Kettenbagger	790.130	2.114.836	37,4%
Radlader	918.284	2.093.480	43,9%

Quelle: eigene Darstellung IMM nach (Fecke, 2018)

Eine Möglichkeit den Energiebedarf während des Maschinenstillstandes zu reduzieren sind Start-Stopp-Automatiken, welche heute noch keine Marktverbreitung erfahren haben, obwohl vielfältige technische Lösungen vorliegen. Technologisch ist das Abschalten der Maschinen deutlich komplexer als die in PKW serienmäßig verbauten Start-Stopp-Automatiken, wird aber als Option von verschiedenen Herstellern angeboten. Brun et.al weisen am Beispiel eines Umschlagkrans Kraftstoffeinsparungen nach. Eine Start-Stopp-Automatik schaltet die Maschine in den Stillstandszeiten, die üblicherweise 1/3 der Betriebszeit betragen, ab (Brun et al., 2015).

3.4.2 Update von Antriebssystemen

In mobilhydraulischen Systemen sind ventilgesteuerte Systeme im Einsatz, die die Versorgung von mehreren Verbrauchern (Beim Bagger sind dies Ausleger, Stiel, Löffel, Drehwerk und Fahrtrieb) parallel erlauben. Für Schwenk- und Fahrfunktionen werden vermehrt Verdrängersteuerungen verwendet, die prinzipbedingt geringere Verluste aufweisen. Ein wichtiger Aspekt bei bediener*innen geführten Systemen ist die Bewegungscharakteristik (lastunabhängig oder lastfühlend), welche die Bedienung maßgeblich beeinflusst und somit Einfluss auf die Kaufentscheidung hat. Als Stand der Technik sind dabei open-center oder closed-center Systeme verfügbar, die über verschiedene Bedieneigenschaften verfügen.

In zahlreichen Forschungsprojekten wurden weitere Architekturen untersucht und in Demonstratoren evaluiert, die große Energieeinsparungen nachweisen. Dabei lassen sich drei Trends beobachten:

- Die Individualisierung von Ventil und Pumpenstrukturen leistet eine am Bedarf der Aktoren orientierte Versorgung und reduziert damit Verluste im Bereich bis zu 30%.

- ▶ Energierückgewinnung und Hybridisierung ermöglichen die Wiederverwendung von eingetragenen Energieanteilen (Regeneration, Rekuperation) und die Erweiterung des Betriebsspektrums (Boost, Phlegmatisierung) im Zusammenspiel von elektrischen, hydraulischen und mechanischen Komponenten.
- ▶ Aktives Energiemanagement senkt den Energiebedarf durch bspw. bedarfsgerechte Kühlung, aktive Abschaltung von Nebenverbrauchern, Drehzahlführung oder die intelligente Prozessführung.

4. Individualisierung von Ventil und Pumpenstrukturen

Getrennte Steuerkanten ermöglichen die unabhängige Steuerung von zu- und abfließendem Volumenstrom. Damit werden die bei Ventilsteuerungen zwangsläufig auftretenden Drosselverluste reduziert und der Systemdruck kann abgesenkt werden. Die Technik bietet Potential für deutliche Energieeinsparungen (bis 40% nachgewiesen in (Eriksson et al., 2007; Lübbert, Sitte, Beck, et al., 2016; Lübbert, Sitte, & Weber, 2016)) ist jedoch steuerungstechnisch aufwändig und wird bislang in einzelnen Maschinen, vorwiegend im Spezialmaschinenbereich kommerziell eingesetzt. Das Vorgehen zeichnet sich durch individuelle Zu- und Ablaufwiderstände (Auflösung der mechanischen Zwangskopplung zwischen den Steuerkanten bzw. des starren Volumenstrom-Druck-Zusammenhangs) aus. Mit einer freien Verschaltung der Ventile können verschiedene Strömungspfade definiert werden, die eine Wiederverwendung oder Regeneration des Volumenstroms ermöglichen. Weitere Vorteile sind die dezentrale Anordnung der Ventile, wodurch die Leitungslänge zwischen Pumpe und Verbraucher reduziert werden kann. Regelungstechnisch bestehen weitere Freiheitsgrade welche die Verschiebung von Funktionen wie Rohrbruchsicherung oder Senkbremseventilfunktionen in die Software ermöglichen. Durch die Nutzung mehrerer gleichartiger Ventile mit einfachen Funktionen kann die Anzahl der Konstruktionsvarianten und die Komplexität der Ventile verringert werden. Trotzdem sind bedingt durch die Steuerungstechnik und die Anzahl der Ventile die Investitionskosten deutlich größer als bei herkömmlichen Systemen.

Die elektronisch gesteuerte Anpassung des benötigten Volumenstroms an den Bedarf („flow-matching“) ermöglicht Einsparungen gegenüber einem klassischen Load-Sensing Einkreisssystem. Finzel weist einen 15% geringeren Energiebedarf an der Arbeitshydraulik eines Baggers mit einem Einkreisssystem und 20% mit einem Zweikreisssystem nach (Finzel, 2011). Scherer zeigt am Beispiel eines Forstkrans, dass sich durch die bedarfsgerechte Versorgung in einem Zweikreisssystem verglichen mit einem Einkreisssystem in einem Standardzyklus 14% Energie einsparen lassen (Martin Scherer, 2015).

Eine weiterführende Individualisierung der Pumpenstrukturen ist die Verdrängersteuerung jedes einzelnen Aktors. Rahmfeld (Rahmfeld & Weber, 2004) weist an einem Radlader 15% Energieeinsparung nach, Zimmermann et.al. weisen an einem Minibagger eine Kraftstoffeinsparung in Höhe von 40% gegenüber einer marktüblichen Maschine nach (Zimmerman et al., n.d.). Hemmnisse für den Einsatz der Technologie in der Praxis sind der größere Platzbedarf sowie die Amortisierung der zusätzlich benötigten Pumpen.

5. Hybridisierung, Elektrifizierung und Energierückgewinnung

Die Individualisierung der Pumpenstrukturen (hier als Verdrängersteuerung bezeichnet) bietet die Möglichkeit der Rückgewinnung von Bremsenergie als elektrische, hydraulische oder mechanische Energie. Somit können Lastspitzen aus Speichern abgedeckt werden und der Dieselmotor kleiner dimensioniert oder im Bereich besserer Wirkungsgrade betrieben werden.

Brun et al. (Brun et al., 2015) zeigen im Projekt „Green Industrial Diesel“, die Möglichkeiten bei der praktischen Anwendung eines Hybridsystems am Beispiel eines Umschlagbaggers auf. Sie

integrieren eine E-Motor-Generator-Kombination auf der Welle des Verbrennungsmotors sowie SuperCaps für die Zwischenspeicherung der Elektroenergie. Durch die nun mögliche Elektrifizierung des Schwenkantriebs erreichen sie 20% Kraftstoffersparnis beim Betrieb des Hybridsystems mit konstanter Arbeitsdrehzahl und 44% Kraftstoff-Ersparnis durch die zusätzliche dynamische Absenkung der Drehzahl im Betrieb.

Auf der Baumaschinenmesse in München 2013 sowie in späteren Veröffentlichungen wurden verschiedene Hybridsysteme mit der Nennung der Kraftstoffeinsparungen durch die Hersteller ausgestellt:

- ▶ Hybridbagger ZH2000 (Hitachi) – 20%,
- ▶ Hybridbagger HB215LC (Komatsu) – 25-40%,
- ▶ Hybridbagger Konzept 9xx (Liebherr),
- ▶ Vollelektrischer Radlader 944K (John Deere) 9-14% und
- ▶ Demonstrator MHL-350 (Terex Fuchs) – 44%.

Elektrifizierung. Durch das Fehlen von leistungsstarken und –dichten Speichertechnologien für Elektroenergie ist ein Batteriebetrieb die aktuell einzige Alternative für Verbrennungsmotoren. Durch die Elektrifizierung des Hauptantriebs können Emissionen vermieden werden, was unter Tage, Indoor oder in Gegenden wo Schadstoffausstoß reduziert werden muss wichtig ist. Der Wirkungsgrad im Bilanzraum von der Batterie zur Umschlagleistung ist besser, weil der Wirkungsgrad der Erzeugung elektrischer Energie nicht berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus ist die in weiten Bereichen ohne Einschränkungen verfügbare Drehzahlvariabilität ein Vorteil elektrischer Antriebe. Eine umfassende Übersicht zur Elektrifizierung der (Fahr-)antriebe in Landmaschinen findet sich in (Aumer, 2018). Geissler setzt einen elektrischen Einzelradantrieb in einem Traktor um und kommt für das Elektromechanische System bestehend aus Generator und Aktor auf vergleichbare Fahrtriebswirkungsgrade wie ein mechanisches Getriebe (Geissler, 2006).

6. Energiemanagement

Die Entkopplung der Drehzahl des Dieselmotors von den Leistungsanforderungen der bedienenden Person ermöglicht einen Motorbetrieb im Wirkungsgradoptimum. Der Motor kann für einen kleineren Drehzahlbereich optimiert werden. Bei einer idealen Betriebsführung des Dieselmotors werden 30-40% Kraftstoffeinsparungen als realistisch angesehen. Hierfür optimierte Motoren sind aktuell noch nicht verfügbar.

Herkömmliche Kühlungen erzeugen eine konstante Umlaufmenge. Bedarfsangepasste Kühl- und Nebenverbrauchersteuerungen passen den Volumenstrom an den Kühlleistungsbedarf an. Die bedarfsorientierte Kühlung verringert den Energiebedarf zur Kühlung, der bei aktuellen Geräten betriebspunktabhängig ca. 10% des Kraftstoffverbrauchs ausmacht.

Die Abschaltung von Nebenverbrauchern oder der gesamten Maschine in Stillstandszeiten birgt eines der größten Potentiale zur Energieeinsparung. Abbildung 25 zeigt dieses Potential anschaulich.

3.4.3 Demonstratoren mit kombinierten Maßnahmen

Im Forschungsprojekt „TEAM - Grüner Radlader“ wurden am Prototypen eines hybriden Radladers verschiedene Energiesparpotentiale untersucht und in der Praxis umgesetzt. Im Ergebnis zeigten sich insbesondere durch die Drehzahlabenkung und die

Arbeitspunktanpassung Kraftstoffersparnisse bis zu 10% gegenüber einem neuen Serienfahrzeug im Vergleich auf einer Baustelle (Schneider et al., 2016).

Durch die Einführung eines weiteren Druckniveaus, die konsequente Drehzahlab senkung des Dieselmotors sowie eine parallele Hybridisierung konnte im Projekt STEAM eine Kraftstoffersparnis zwischen 25 und 32 Prozent – je nach Arbeitsschritt an einem Bagger nachgewiesen werden (Vukovic, 2017).

Heybroek (Heybroek, 2017) präsentiert verschiedene energiesparende Antriebskonzepte für einen Radlader. Die Einführung eines „Common pressure Rail Systems“ in Verbindung mit einem hydraulischen Transformator ermöglicht Energieeinsparungen in Höhe von 30-50%.

3.4.4 Alternative Antriebstechnologien

Die dezentrale Kraftstoffverbrennung kann über das CO₂-Äquivalent mit der zentralen Elektroenergieerzeugung verglichen werden. Der Strommix in Deutschland produziert 2019 voraussichtlich 401 g CO₂/kWh (Umweltbundesamt, 2020b), Tendenz fallend. Bei Annahme eines Wirkungsgrades von 95% eines Elektromotors ergeben sich 422 g CO₂/kWh Energie an der Motorwelle. Dieseldieselfkraftstoff produziert bis zur Verbrennung 295 g CO₂/kWh (incl. 25 Gramm Verarbeitung und Transport zum Endkunden (Reinhardt, 1993)). Bei einem Verbrennungsprozess im Motor beträgt der Wirkungsgrad maximal 30-40%, was eine CO₂-Bilanz von 737-983 g CO₂/kWh an der Motorwelle bedeutet. Die Verstromung von Dieseldieselfkraftstoff und anschließende Wandlung mit 95% Wirkungsgrad des Elektromotors weist mit 936 g CO₂/kWh eine ähnliche CO₂-Bilanz bei der Betrachtung bis zur Motorwelle auf (Wissenschaftlicher Dienst des deutschen Bundestages, 2007). **Tabelle 13** zeigt eine Übersicht angenommener CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde in Abhängigkeit der Primärenergieverstromung.

Tabelle 13: CO₂-Bilanz mechanischer Energie an der Motorwelle

Nach (Umweltbundesamt, 2020b), (Reinhardt, 1993), (Wissenschaftlicher Dienst des deutschen Bundestages, 2007), eigene Berechnungen

Energieträger	Emissionen in g CO ₂ /kWh an der Motorwelle
Strommix DE 2019*	422
Strommix Welt 2018	460
Strom aus Braunkohle 2018	1032-1295
Strom aus Diesel	936
Dieselmotor	737-983 g CO ₂ /kWh

*Prognose nach (Umweltbundesamt, 2020b)

Der CO₂-Ausstoß für die Produktion von Batterien als Energiespeicher liegt bei 175 kg CO₂/kWh (Romare & Dahlöf, 2017). Bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 7680 Betriebsstunden eines 20 t Baggers hätte der Ersatz von Dieseldieselfkraftstoff durch Batteriespeicher eine CO₂-Einsparung von ca. 1% zur Folge (Caldwell, 2019). Die weltweite Baggerflotte von 8-40 t (1 Mio. Maschinen) benötigt mit einem Energiebedarf von 90 TWh mehr als die gesamte jährlich verfügbare offshore-Windenergie. Ohne die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien ist aus rein energetischer Sicht eine Substitution des Dieselmotors nur bei der Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energie sinnvoll. Der Einsatz von Verbrennungsmotoren mit LPG, CNG, NH₄, H₂, oder Gemischen kann bedingt durch niedrigere Schadstoffausstoße ein zweiter sinnvoller Ansatz neben der Elektrifizierung sein.

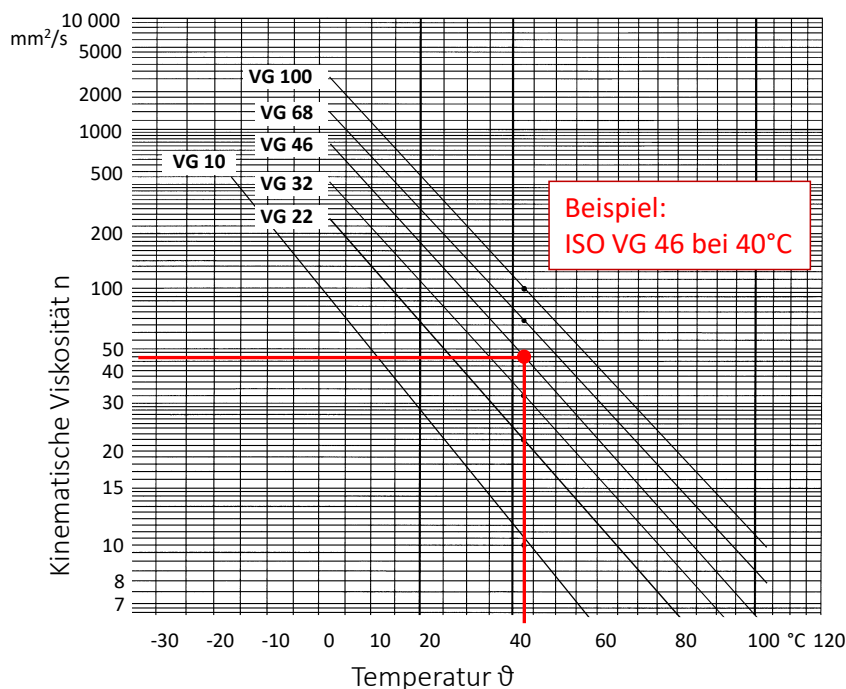
3.5 Einsparpotentiale durch die Wahl der Druckflüssigkeit

Hydraulikflüssigkeiten (auch Druckflüssigkeiten genannt) kommen in verschiedenen Viskositäten (Zähigkeiten) zur Anwendung. Flüssigkeiten mit großer Viskosität weisen dabei eine bessere Tragfähigkeit auf. Es entstehen bei der Bewegung jedoch auch größere Scherkräfte, welche zu stärkerer Reibung und damit einhergehenden Wärmeverlusten führen. Ist die Viskosität zu groß, tritt erhöhter Verschleiß auf, der Fluidfilm kann abreißen, was zum Versagen von Komponenten (Pumpen, Ventile, Motoren) führt. Bei geringen Viskositäten sinkt die Reibung im Fluid, was zu geringeren Strömungsverlusten, jedoch auch zu verringerten volumetrischen Wirkungsgraden führt. Auch die Tragfähigkeit sinkt: die Höhen der Schmierpalte verringern sich, es kommt zu erhöhter Reibung in den Komponenten, was bei Unterschreiten einer kritischen Grenze zum Bauteilversagen führen kann. Der Zusammenhang zwischen Verlusten und der Viskosität des Druckmediums wird in Grundlagenwerken ausführlich beschrieben (Gebhardt & Weber, 2020b).

Abbildung 26 zeigt die Abhängigkeit unterschiedlicher Viskositätsklassen (VG) von der Temperatur für Mineralöle.

Abbildung 26: Abhängigkeit der Viskosität verschiedener Viskositätsklassen von der Temperatur

Viskositäts-Temperatur-Kennlinien für ISO VG 10 bis ISO VG 100



Fluide mit VI-Verbesserern zeigen eine geringere Steilheit im Diagramm

Quelle: Eigene Darstellung IMM nach (DIN 51563, n.d.)

Für Maschinenbetreiber gilt es die niedrigstmögliche, für den gesunden Betrieb der Maschine mögliche Viskosität zu nutzen.

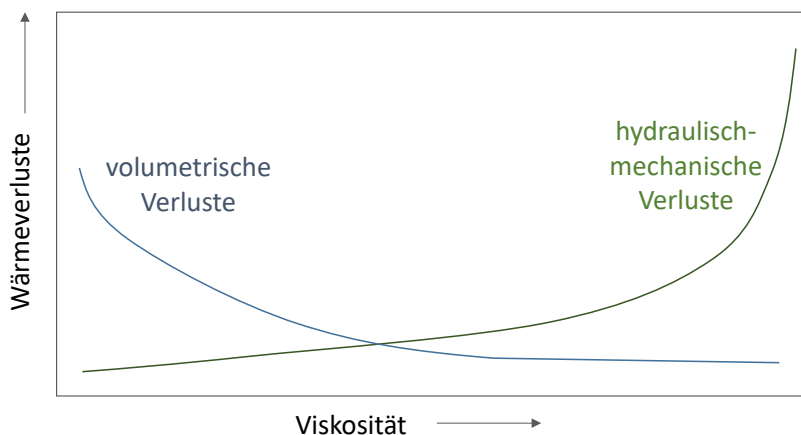
Hersteller hydraulischer Komponenten geben in der Regel einen zulässigen Viskositätsbereich an. Maschinenhersteller verwenden diese Komponenten in Ihren Maschinen und Anlagen und kennen durch die von ihnen durchgeführte Konstruktion und Dimensionierung sowie Erfahrungen den Betriebsbereich der Maschinen bei ihren Kunden. Dabei sind sie bestrebt mit geringem Aufwand möglichst vielen Einsatzsituationen gerecht zu werden.

Die vom Maschinenhersteller gegebenen Empfehlungen für den Einsatz der Druckflüssigkeiten beschränken sich in der Regel auf:

- ▶ die maximale Viskosität für den Start unter Last,
- ▶ den Viskositätsbereich für den „optimalen“ Betrieb und
- ▶ die größte und kleinste mögliche Betriebsviskosität.

Die Betriebsbedingungen beim Maschinenbetreiber lassen in den meisten Fällen eine Optimierung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu. Die Tatsache dass die Kosten der Druckflüssigkeit im Allgemeinen weniger als 1% der Betriebskosten der Maschinen ausmachen, die Betriebskosten jedoch bis zu 50% beeinflussen (Krstić, 2010) zeigt das Potential dieser Vorgehensweise auf. Die Auswahl der richtigen Druckflüssigkeit ist komplex, da allein für die bestmögliche Viskosität eine Vielzahl von –teilweise gegenläufigen Abhängigkeiten bestehen. Die Viskosität eines Fluids ist von der Viskositätsklasse (VG) sowie der aktuellen Temperatur abhängig.

Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Wärmeverlusten und Viskosität (schematisch)



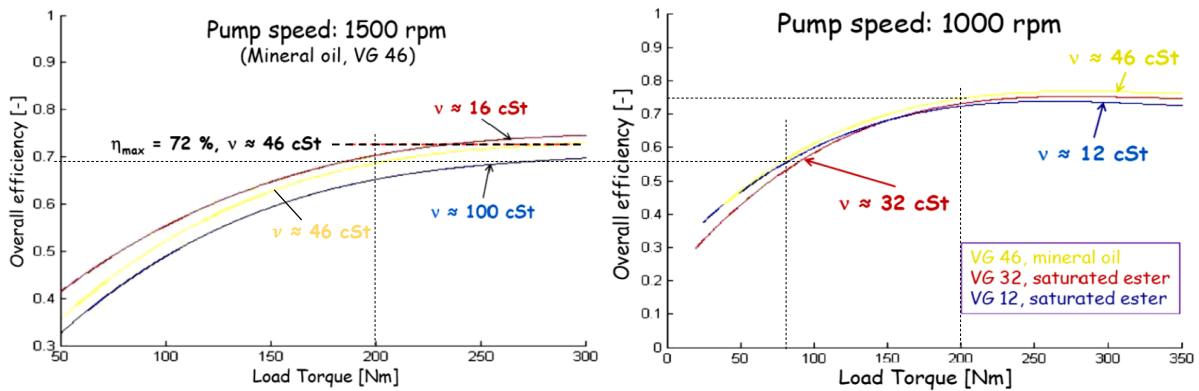
Quelle: eigene Darstellung IMM

Abbildung 27 zeigt qualitativ den Zusammenhang zwischen Wärmeverlusten und der Viskosität des Druckmediums in einer Maschine. Das energetische Optimum ist dabei stark von den eingesetzten Komponenten und dem Betrieb der Maschine abhängig.

Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit dem Einsatz und der Optimierung von Druckflüssigkeiten in Hydrauliksystemen, insbesondere in Verdrängereinheiten, da die Viskosität hier maßgeblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat.

Rydberg zeigt in Messungen an einem hydrostatischen Getriebe mit einer Druckflüssigkeit bei verschiedenen Temperaturen (**Abbildung 28**, links) sowie verschiedenen Druckflüssigkeiten bei konstanter Temperatur von 40°C (**Abbildung 28**, rechts) den erreichbaren Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Belastung (Rydberg, 2013).

Abbildung 28: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehzahl, Lastmoment, Druckfluid und Temperatur

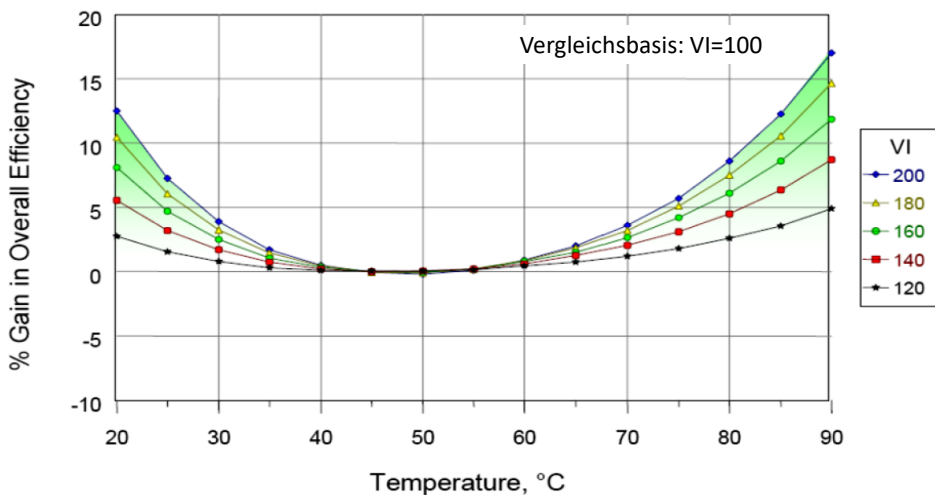


Quelle: (Rydberg, 2013), Beschreibungen ergänzt durch IMM

Es zu erkennen, dass der Wirkungsgrad deutlich von der Drehgeschwindigkeit, Belastung, Öltemperatur (Abbildung 28, links: Einstellung der Viskosität über Temperatur) sowie der Druckflüssigkeit selbst (Abbildung 28, rechts) abhängig ist.

Klassische Fluide weisen eine logarithmische Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur auf (Abbildung 26). Darüber hinaus finden heute in zunehmendem Maße Mehrbereichsöle Anwendung, deren Viskosität in geringerem Maße von der Temperatur abhängig ist. Die Beschreibung dieser Abhängigkeit wird durch den Viskositätsindex (VI) ausgedrückt. Insbesondere bei großen Schwankungen der Betriebstemperatur, was in mobilen Maschinen der Fall ist, können durch Fluide mit hohem VI Energieeinsparungen erzielt werden. Scherer zeigt in seiner Untersuchung von Ölen mit erhöhtem VI am Beispiel von Flügelzellenpumpen, dass Energieeinsparungen von 20% insbesondere bei hohen Temperaturen erreicht werden können (Markus Scherer et al., 2004). Dustman zeigt in seiner Arbeit den Effizienzgewinn eines Mehrbereichs-Hydrauliköls mit großer Scherstabilität mit VI-Verbesserern am Beispiel einer Flügelzellenpumpe (Dustman, 2006). **Abbildung 29** zeigt die in einer mobilen Anwendung erreichten Ergebnisse. Es ist zu erkennen, dass insbesondere bei großen Schwankungen der Betriebstemperatur VI-Verbesserer zu deutlichen Effizienzsteigerungen führen können.

Abbildung 29: Verbesserung des Pumpenwirkungsgrades in Abhängigkeit von VI und Temperatur



Quelle: (Rydberg, 2013)

Im Spritzgießmaschinenbau wirbt ein Hersteller für den Einsatz von Spezialölen, mit denen sich die Energieaufnahme im Betriebsbereich von 27°C bis 45°C zwischen 10 und 15% reduzieren lässt (Dr. Boy GmbH, 2019).

König weist anhand von Langzeitmessungen verschiedener Spritzgießmaschinen in der Praxis nach, dass der Ersatz eines ISO VG 46 Öls durch ein niedrigviskoseres Öl der Viskositätsklasse VG 22 (bei gleichem Einkaufspreis des Öls) zu Energieeinsparungen von 3-5 Prozent führt ohne dass die Lebensdauer der Komponenten beeinträchtigt wird (König, 2020).

Gespräche mit Mineralölexperten ergaben, dass in der Praxis, insbesondere bei stationären Anwendungen, großes Potential für die Verringerung der Viskosität besteht, Maschinenbetreiber aus Angst vor Maschinenstillstand und/oder dem Verlust von Gewährleistungsansprüchen gegenüber dem Maschinenhersteller dies aber nur zögerlich umsetzen.

Zusammenfassend können durch die energieoptimale Auslegung einer (Standard-)Druckflüssigkeit in der Praxis deutliche Energieeinsparungen erzielt werden. Darüber hinaus kann durch den Einsatz von VI-Verbesserern („VI-Improver“) und/oder der Einsatz von Mehrbereichsölen die Energieaufnahme von Maschinen weiter reduziert werden.

3.6 Analyse möglicher Substitutionsbereiche

Energieeinsparungen können mitunter durch den Ersatz einer Technologie durch eine andere erreicht werden. Gegenstand der Analyse ist die Frage, in welchen Applikationen pneumatische und hydraulische Aktoren und Systeme durch direktelektrische bzw. elektromechanische oder alternative Antriebe ersetzt werden können und wo dies unter welchen Randbedingungen technisch sinnvoll sein kann. Die folgend angestellten Betrachtungen sollen anhand von bezogenen Kenngrößen eine Vergleichbarkeit der Antriebstechnologien auf abstraktem Niveau herstellen. Über die tatsächliche Realisierbarkeit eines Antriebssystems kann damit noch keine Aussage getroffen werden, da diverse weitere Randbedingungen (bspw. am Markt verfügbare Bauformen und Baugrößen der Antriebe, Bereitstellung von Druckluft oder Hydraulikversorgung im Umfeld der zu entwickelnden Maschine/Anlage) zu berücksichtigen sind. Eine pauschale energetische und wirtschaftliche Bewertung ist nicht möglich, da die hierfür zu betrachtenden Randbedingungen und Einflussgrößen vielfältig und sehr anwendungsspezifisch sind. Kurz – jedes Antriebssystem kann bzgl. des Energieeinsatzes im Betrieb ungünstig ausgelegt werden.

3.6.1 Substitution von Vakuumanwendungen

Die Bereitstellung von Vakuum kann, ohne den Zwischenschritt der Druckluftherzeugung, direkt elektrisch mittels Vakuumpumpen oder -gebläsen erfolgen. Eine direkte Substitution von Druckluftejektoren durch Vakuumpumpen ist nur in wenigen Fällen technisch und ökologisch sinnvoll. Druckluftejektoren werden vorrangig dezentral eingesetzt, normale Vakuumpumpen werden zentral betrieben, die Verteilung erfolgt über ein Vakuumnetz. Denkbar ist die Substitution durch Vakuumpumpen auf der Ebene der Produktionsstraßen, sofern diese größere Vakuummengen auf vergleichbarem Vakuumniveau benötigen. Bei der Umrüstung müsste jedoch zusätzlich ein Vakuumnetz verlegt und alle Maschinen angeschlossen werden. Es ist keine Studie bekannt, die einen solchen Umbau beschreibt und auswertet. Das Substitutionspotential wird auf Grund der geringen Anwendbarkeit als sehr gering eingeschätzt.

Seit wenigen Jahren sind stark verkleinerte elektrische Vakuumerzeugungseinheiten am Markt erhältlich. Diese können als dezentrale elektrische Vakuumerzeuger eingesetzt werden und sind als direktes Substitut zu Druckluftejektoren ausgelegt. Auf Grund des fehlenden Zwischenwegs über die Druckluft, lässt sich Vakuum mit diesen Technologien, bei korrekter Auslegung,

deutlich effizienter bereitstellen. In Referenzprojekten eines Herstellers werden Effizienzsteigerungen von 50% durch die Substitution angegeben (EtaOpt, 2020). Die bisher erhältlichen Produkte stellen nur geringe Saugvolumenströme bereit und sind z.B. für den Einsatz auf Industrierobotern gedacht (Schmalz, 2020).

Eine Quantifizierung des Energieeinsparpotentials durch die Substitution von Druckluftvakuumanwendungen ist auf Grund der Datenlage nicht möglich.

3.6.2 Substitution von pneumatischen und hydraulischen Antrieben

3.6.2.1 Trends und Entwicklungen in der elektrischen und elektromechanischen Antriebstechnik

Um die Substitutionspotentiale für pneumatische und hydraulische Antriebe erfassen zu können, werden zunächst typische elektrische und elektromechanische Antriebssysteme vorgestellt und aktuelle Entwicklungstrends mit Bezug zur Substitution hydraulischer und pneumatischer Antriebe diskutiert. Die aktuell dominierenden Entwicklungstrends lassen sich unter den Schlagworten Intelligenz sowie Leistungs- und Effizienzsteigerung zusammenfassen. In **Abbildung 30** sind hierzu einige der im Folgenden ausführlich erläuterten Entwicklungen plakativ dargestellt. Hersteller elektrischer und elektromechanischer Antriebssysteme propagieren zunehmend aggressiv die Substitution hydraulischer und pneumatischer Antriebe im industriellen Umfeld, wobei häufig auf den Wirkungsgrad bzw. Energiebedarf verwiesen wird (vgl. **Abbildung 30**). Pauschale Aussagen hierzu sind aber gemeinhin kaum möglich, da der Energiebedarf stark von der Auslegung des Antriebssystems und den Randbedingungen des Einsatzfalls abhängt. Aktuell erschließen direktelektrische und elektromechanische Antriebssysteme neue Einsatzgebiete und Marktsegmente. Dies wird zum einen durch die (preis)günstige Verfügbarkeit der Komponenten und zum anderen durch die zunehmende Funktionsintegration und Dezentralisierung (vgl. **Abbildung 30**) getrieben. Ziel der Dezentralisierung ist es Verkabelungs- und Installationsaufwand zu verringern und die Modularität von Maschinen und Anlagen zu steigern. Dieser Entwicklung kommt zu Gute, dass Steuerungs- und Monitoringsysteme immer weiter miniaturisiert werden und mittlerweile Energie und Daten (Feldbusanbindung) in einem Kabel oder sogar auf der gleichen Leitung bereitgestellt werden können. Gegenstand aktueller Forschungen sind kabellose Anbindungen – auch für industrielle Anwendungen – bspw. unter Nutzung des Mobilfunkstandards 5G¹².

¹² Entsprechende Entwicklungen zur Dezentralisierung, Condition-Monitoring usw. sind auch im Bereich der Hydraulik und Pneumatik zu beobachten.

Abbildung 30: wichtige Trends in der elektrischen Antriebstechnik

Erschließung Marktsegmente / Marktdurchdringung



entnommen aus: „Elektrische Antriebe für Energiemanagement-systeme“ [Antriebstechnik 2019/07, S. 22-24]

Leistungs(dichte)steigerung



Entwicklung der Leistungsdichte von E-Motoren: „Torquemotoren – Stärken, Einsatzgebiete und typische Optimierungskriterien“, in: Konstruktionspraxis, Online-Artikel vom 18.06.2018]

Dezentralisierung und Intelligenz

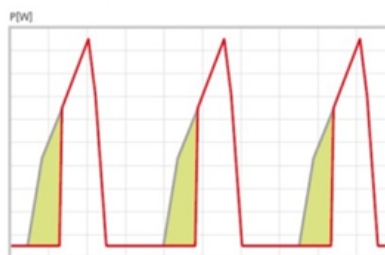


Dezentrale Servoantriebe mit Einkabel-Anschluss, Beckhoff AMP8000 [www.beckhoff.de]

Energiespeicher / Rekuperation

Energieeinsparung mit DES

— mit DES ■ Energieeinsparung
 — ohne DES



Energiespeichersysteme zur Unterstützung des DC-Zwischenkreises von Frequenzumrichtern, Quelle: [Michael Koch GmbH, Broschüre: „Bremsenergie managen: Handling-Roboter“]

Quellen: (www.beckhoff.de, Drescher, 2018; ‘Elektrische Antriebe Für Energiemanagement-Systeme’, n.d.; Michael Koch GmbH, 2016), Anordnung: IMM

3.6.2.1.1 Rotatorische und lineare Elektromotoren

Aktuell ist im industriellen Einsatzfeld mit jeder neuen Motorgeneration die weitere Steigerung des Motorwirkungsgrads und der Leistungsdichte zu beobachten. Besonders deutlich wird dies bei Synchron-Servomotoren, welche bei den üblicherweise begrenzten Einbauverhältnissen eine hohe Leistungsdichte realisieren müssen (vgl. **Abbildung 30**). Zunehmend kommen auch elektrische Direktantriebe wie Torque- und Linearmotoren zum Einsatz, um die Nachteile einer Getriebestufe wie u. a. Spiel/Hysterese und begrenzte Steifigkeit im Antriebsstrang zu eliminieren. Torquemotoren sind meist als Synchron-Servomotoren ausgeführt und bedienen sich des großen Hebelarms, der mit einem großen Rotordurchmesser einhergeht. Sie erreichen hohe Drehmomente ab Drehzahl Null. Wie alle elektrischen Antriebe sind auch Torquemotoren kurzzeitig hoch überlastbar (meist Faktor 3 bis 5 bezogen auf das Nennmoment). Torquemotoren können mittlere bis große rotatorische hydraulische Motoren prinzipiell ersetzen. Hydraulische Motoren bieten aber meist eine höhere Leistungsdichte und sind robuster.

Bezüglich der Leistungsdichte stellen normalleitende elektromotorische Flugantriebe (AC-Flugantriebe), die sich derzeit in der Entwicklungs- bzw. Testphase befinden, die Spitze der klassischen Elektromotorenteknik dar (Drescher, 2018). Darüber hinaus bieten neuartige Motoren mit supraleitenden Permanentmagneten oder supraleitenden Spulensystemen weiteres Potential zur Steigerung der Leistungsdichte bis in die Größenordnung hydraulischer

Antriebe. Bis zur Serienreife und der nennenswerten Übertragung der Technologie in die industrielle Anwendung wird nach Einschätzung der Autoren noch mindestens eine Dekade vergehen.

Linearmotoren werden üblicherweise als eisenbehaftete Linearmotoren (mit Eisen o. ä. zur besseren Flussführung im Primärteil), als eisenlose Linearmotoren (kein Eisen o. ä. im Primärteil) oder in Solenoidbauweise (eisenbehaftet oder eisenlos mit konzentrisch zu den Magneten angeordneten Spulen) angeboten. Entsprechend ihrer Anwendung als Servo- bzw. Positionierantriebe sind Leistungsbereiche bis knapp über 10 kW Nennleistung bei 3-5-facher kurzzeitiger Überlastbarkeit typisch. Je nach Ausführung der Motorwicklung sind hohe Geschwindigkeiten oder hohe Kräfte möglich. Sonderanfertigungen bis 100 kN Nennkraft sind mit hohem technischen Aufwand möglich. Linearmotoren können bei kleinen Leistungen Hydraulikzylinder, vor allem in sehr dynamischen Anwendungen, ersetzen. Linearmotoren werden zudem als Alternative für pneumatische Antriebe beworben (NTI AG, 2020) wobei die bessere Positionierbarkeit und die Möglichkeit der programmierbaren Bewegungsführung vorteilhafte Technologiemerkmale sind¹³. Linearmotoren werden oft in herstellerspezifisch standardisierten Modulen (Linearmodule) samt Führung und Messsystem verbaut, was die kundenseitige Integration erleichtert. Aktuell kommen zunehmend Linearaktuatoren mit integrierter Leistungselektronik, wie bspw. der in (*Datenblatt AA1121 - Linearaktuator*, n.d.) beschriebene Linearaktuator, in den Markt.

3.6.2.1.2 Rotatorische Getriebetechnologie

Getriebeantriebe sind die klassische Form des rotatorischen elektromechanischen Antriebs. Vielfältige Getriebetypen haben sich etabliert, wobei überwiegend Zahnriemen- und Zahnradgetriebe zum Einsatz kommen. Für industrielle Anwendungen sind vielfach auf genormte Motorgrößen abgestimmte Baukastensysteme verschiedener Getriebehersteller verfügbar, was diese Antriebsart wirtschaftlich macht. Getriebeantriebe sind im Leistungsbereich von Milliwatt bis Megawatt zu finden. Eine neuere Entwicklung sind kompakte Servoaktuatoren. Diese sind in ihrer Größe auf typische Synchron-Servomotoren abgestimmt oder integrieren diese vollständig (Wittenstein AG, 2019). Dementsprechend sind sie meist im Leistungsbereich bis ca. 10 kW Nennleistung in positions- oder geschwindigkeitsgeregelten Antriebssystemen verbaut. Gegenüber Torquemotoren benötigen Servoaktuatoren geringere Ströme, vor allem beim Halten von Lasten, sind aber in ihrer Dynamik und Lebensdauer begrenzt. Getriebeantriebe und insbesondere Servoaktuatoren können rotatorische hydraulische Motoren mittlerer Leistungsdichte ersetzen.

3.6.2.1.3 Elektromechanische Linearantriebe mit Gewindetrieben

Zur Wandlung der rotatorischen Motorbewegung in eine translatorische Abtriebsbewegung kommen im industriellen Umfeld häufig Gewindetribe zum Einsatz. Daneben werden auch Zahnriemenübersetzungen oder Ritzel-Zahnstange-Kombinationen sowie diverse andere Übertragungsgetriebe genutzt. Die folgenden Ausführungen fokussieren auf Gewindetribe, da diese typischerweise die höchsten Kraft- und Leistungsdichten realisieren und aufgrund ihrer Bauform (besonders als Elektrozyylinder) eine gute Vergleichbarkeit mit hydraulischen und pneumatischen Antrieben bieten. Die einfachste Bauform bilden die Gleitgewindetribe (GGT), bspw. mit Trapezgewindespindeln. Diese sind sehr preisgünstig aber in ihrer Leistungsfähigkeit und Präzision begrenzt. Sie kommen als Alternative für pneumatische Linearantriebe

¹³Eine präzise Bewegungsführung bedarf bei hydraulischen und pneumatischen Linearantrieben meist zusätzlicher Sensorik sowie Regelungs- bzw. Ventiltechnik. Entsprechende Elektronik ist bei Synchron-Linearmotoren in jedem Fall erforderlich und kann daher als integraler Bestandteil des Antriebssystems betrachtet werden.

und -zylinder in Frage (Dunkermotoren AG, 2019). Kugelgewindetriebe (KGT) kommen ursprünglich aus dem Werkzeugmaschinenbau, finden aber mittlerweile breite Anwendung in vielen Bereichen. Kennzeichnend für den Kugelgewindetrieb ist seine geringe Reibung (Rollreibung) und der damit verbundene hohe mechanische Wirkungsgrad von typischerweise >90%. Auch KGT können bei geringen Präzisionsanforderungen mittlerweile sehr günstig beschafft werden und damit ebenfalls eine – bezogen auf die Beschaffungskosten – wirtschaftliche Alternative zu pneumatischen Antrieben sein (Dunkermotoren AG, 2019). Zur Substitution von Hydraulikzylindern können KGT-Antriebe bis zu einer bestimmten Leistungsdichte eingesetzt werden. Gegenüber dem Kugelgewindetrieb realisieren Rollengewindetriebe (RGT) eine Vielzahl von eher linienförmigen Wälzkontakten. Dadurch erreichen sie bei gleicher Baugröße höhere Tragzahlen und damit gegenüber KGT eine höhere Kraftdichte. Sie eignen sich folglich tendenziell besser als Alternative für Hydraulikzylinder, sind aber aufwändiger zu fertigen und damit teurer als der KGT-Antrieb. Gegenüber Hydraulik- und Pneumatikzylindern ist – abgesehen von einem evtl. erforderlichen Dichtungswechsel – die Lebensdauer von Gewindespindelantrieben begrenzt und zudem stark vom Lastkollektiv abhängig. Dementsprechend können Hydraulik- bzw. Pneumatikzylinder in Stellantrieben, die nur selten arbeiten, bis zu einer höheren Kraft- und Leistungsdichte durch GGT, KGT und RGT ersetzt werden als Hydraulik- bzw. Pneumatikzylinder in stark ausgelasteten Antriebssystemen, bspw. in mobilen Arbeitsmaschinen. Eine Substitution 1:1, bspw. anhand identischer Bauraumanforderungen und Spitzenkräfte, ist folglich ohne Berücksichtigung des Lastkollektivs nicht möglich.

Gewindetriebe werden häufig in Lineareinheiten, kombiniert mit einer Linearführung, teils mit Antriebsmotor und Messsystem und häufig auch als sogenannte Elektrozyylinder eingesetzt. Letztere werden z. T. als Alternative zu Pneumatik- bzw. Hydraulikzylindern ausgelegt und auch beworben. Flanschabmaße und die mechanischen Anschlussmöglichkeiten sind dann vergleichbar oder sogar identisch. Besonders bei integrierten elektromechanischen Antrieben wie Elektrozyklindern ist die dauerhaft nutzbare mechanische Leistung eher durch den integrierten Elektromotor (Erwärmung) begrenzt als durch die mechanischen Komponenten. Charakteristisch für das Kraft- Geschwindigkeits-Kennfeld ist dessen Abknicken bei höheren Geschwindigkeiten, welches dem Feldschwächebereich des treibenden Synchronmotors entspricht.

3.6.2.1.4 Unkonventionelle Aktoren

Neben elektrischen, auf der Wirkung der Lorentz- oder Reluktanzkraft basierenden Antrieben, gibt es noch weitere physikalische Effekte die zur Krafterzeugung genutzt werden können. Unter den diversen Wirkprinzipien sind der Piezoeffekt sowie der Formgedächtniseffekt hervorzuheben.

Piezoantriebe kommen bei kleinen Leistungen und minimalen Bauräumen in miniaturisierten Systemen, bspw. in Kameraobjektiven zum Einsatz. Die entsprechenden Aktoren können mit geringen Spannungen im Volt-Bereich betrieben werden. Größere, kompakte Piezo-Stapelaktoren oder membranartige Biegeumwandler werden mit höheren Spannungen bis in Größenordnungen von 1000 Volt betrieben. Die von der Spannung erzeugte Ladungsverschiebung sorgt für eine Verformung des Kristallgitters des Piezowerkstoffes und erzeugt dabei einen geringen Hub. Piezoaktoren zeichnen sich durch höchste Arbeitsfrequenzen (bis in den Kilohertz-Bereich) auch bei großen Kräften (bis in den Kilonewton-Bereich) aus, erzeugen aber nur geringe Hübe. Trotzdem erreichen sie in Folge der hohen Arbeitsfrequenzen hohe Leistungsdichten. Der Aufwand für Ansteuerung (Hochspannungsverstärker) und Betrieb ist hoch. Größere Piezoaktoren finden sich daher in Spezialanwendungen. Für die Substitution von pneumatischen und hydraulischen Antrieben sind solche Hochvolt-Piezoaktoren derzeit praktisch nicht relevant. Eine andere Bauform sind Piezoschreittriebe bzw. Stick-Slip-

Antriebe, wie bspw. der in (NANOS Instruments GmbH, 2015) vorgestellte typische Vertreter. Diese miniaturisierten Antriebe realisieren meist Maximalhübe <100 mm bei Kräften <100 N. Sie benötigen nur geringe Spannungen und könnten damit prinzipiell als Alternative zu kleinen Pneumatikzylindern eingesetzt werden. Beispiele für eine solche Substitution sind bisher nicht bekannt, was auf die vergleichsweise hohen Kosten der Piezoantriebe zurückzuführen ist. Die Motivation für den Einsatz von Piezoschreitantrieben liegt vorwiegend in der Realisierung präziser Stellbewegungen, teils auch ohne Positionsrückführung sowie der Selbsthaltung im stromlosen Zustand.

Aktoren basierend auf dem Formgedächtniseffekt werden momentan in ersten Anwendungen adaptiert (Rademacher, 2018). Der Formgedächtniseffekt bewirkt eine Umwandlung des metallischen Gitters bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen, was zu einer Längenänderung des Aktors führt. Die Umwandlung kann thermisch (thermischer Formgedächtniseffekt, Größenordnungen <200°C) oder durch ein angelegtes Magnetfeld (magnetischer Formgedächtniseffekt) induziert werden. Formgedächtnisaktoren haben ein sehr hohes spezifisches Arbeitsvermögen. Die nutzbare Leistung hängt allerdings vom Aktivierungsprinzip ab und ist bei thermischer Aktivierung durch die möglichen Heiz- und Abkühlraten begrenzt. Momentan werden erste, kleine, auf Formgedächtnis-Drähten oder Membranen basierende, Aktoren am Markt angeboten, welche Kräfte in Größenordnungen unterhalb 100 N erzeugen können. Der Bereich der Hochlast-Aktorik ist aktuell Gegenstand anwendungsbezogener Forschung. Dabei werden bspw. kompakte Körper aus Formgedächtnislegierung als Aktorelement eingesetzt. Derartige Hochlastaktoren könnten wegen ihres hohen Arbeitsvermögens einen Ersatz für hydraulische Klemm- und Spannfunktionen (kurze Hübe eher <1 mm) bilden. Draht- und Membranaktoren könnten eine Alternative zu kleinen Pneumatikzylindern, insbesondere in Klemm- und Spannfunktionen darstellen. Beispiele für eine solche Substitution sind bisher nicht bekannt.

3.6.2.1.5 Hubmagnete und Solenoidaktoren

Für begrenzte Hübe und Kräfte könnten auch elektromagnetische Schaltaktoren (Hub- bzw. Schaltmagnete) eingesetzt werden, um kleine Pneumatikzylinder zu ersetzen. Dabei ist jedoch die individuelle Kraft-Weg-Kennlinie zu berücksichtigen sowie die für die Rückstellung benötigte Kraft (meist Gewicht- oder Federkraft). Der Umfang der Substitutionsmöglichkeiten ist dadurch eher gering. Beispiele für die Substitution sind bisher nicht bekannt.

3.6.3 Übersicht der Überschneidungsbereiche Hydraulik – Pneumatik – Elektromechanik – Direktantriebe

Die alternativ zu hydraulischen und pneumatischen Antrieben prinzipiell in Frage kommenden Antriebstechnologien sind in **Abbildung 31** und **Abbildung 32** plakativ zusammengefasst.

Abbildung 31: Übersicht der Alternativen zu hydraulischen Antrieben

 <p>Rotatorischer Direktantrieb: Nennmomente bis 100kNm bis 1000kW, 15kW/kg typisch 100...10.000 U/min</p> <p>Mechanische Getriebe: beliebige Übersetzungen 98% Wirkungsgrad/Stufe typisch: -Stirnrad $i=10$ -Zykloidgetriebe $i=280$</p> 	<p>Lineardirektantrieb (Linearmotor): typisch bis einige 10kN Spitzenkraft</p>   <p>Lineare Aktor über Planetenrollengewindetrieb: bis 2000kW (aktuell nicht nutzbar) bis ca. 2000kN dynamisch</p>	 <p>Lineare Aktor über Kugelgewindetrieb: bis ca. 40kW bis ca. 200kN dynamisch -typisch: -mittlere Dynamik $<2\text{m/s}$ -mittlere Kräfte $<50\text{kN}$ -hohe Präzision, spielfrei -geringer Wartungsaufwand</p>
--	--	--

Bildquellen: Bosch Rexroth AG, Getriebebau Nord GmbH & Co. KG, IDAM AG & Co. KG, Anordnung: IMM

Alternativ zu hydraulischen Aktoren kommen vorwiegend elektromechanische Dreh- bzw. Linearantriebe in Frage (Abbildung 31). Bei Linearantrieben dominieren dabei Gewindespindelantriebe mit Kugel- oder Rollengewindetrieb, häufig ausgeführt als sogenannte Elektrozyylinder. Rotatorische hydraulische Antriebe können technisch zudem durch drehmomentstarke Elektromotoren, welche als (High-)Torquemotoren bezeichnet werden, ersetzt werden.

Abbildung 32: Übersicht der Alternativen zu pneumatischen Antrieben

 <p>Rotatorischer Direktantrieb: Nennmomente bis 100kNm bis 1000kW, 15kW/kg typisch 100...10.000 U/min</p> <p>Mechanische Getriebe: beliebige Übersetzungen 98% Wirkungsgrad/Stufe typisch: -Stirnrad $i=10$ -Zykloidgetriebe $i=280$</p> 	<p>Kleine Lineardirektantriebe: meist als Solenoid-Linearmotor</p>  <p>Hubmagnet: für einfache Schaltfunktionen -stromlos selbsthaltende Ausführungen möglich -begrenzte Kräfte</p> <p>Piezoaktoren und FGL-Aktoren: Potentiell als Ersatz für kleine Pneumatikzylinder, bisher aber kaum relevant</p>	 <p>Lineare Aktor über Gleit- oder Kugelgewindetrieb: meist als Elektrohubzylinder -Baugrößen und Peripherie angelehnt an Pneumatikzylinder -von einfachen unregelmäßig DC- Motoren bis zu hochintegrierten, positionsgeregelten Servoantrieben</p>
--	--	---

Bildquellen: IDAM AG & Co. KG, Harmonic Drive SE, LinMot GmbH, Conrad Elektronik SE, Anordnung: IMM

Für pneumatische Antriebe bieten sich Alternativen in Form von elektromechanischen Dreh- bzw. Linearantrieben (Abbildung 32) an. Dazu kommen aber, wegen der geringeren Leistungsanforderungen und höherem Kostendruck, vorwiegend einfache Getriebetypen bzw. kostengünstige Kugel- und Gleitgewindetriebe in Frage. Zunehmend drängen Hersteller von Linearmotoren in typische Pneumatikanwendungen, besonders in der Automatisierungstechnik in Anwendungen in denen eine definierte Bewegungs- bzw. Kraftführung vorteilhaft ist.

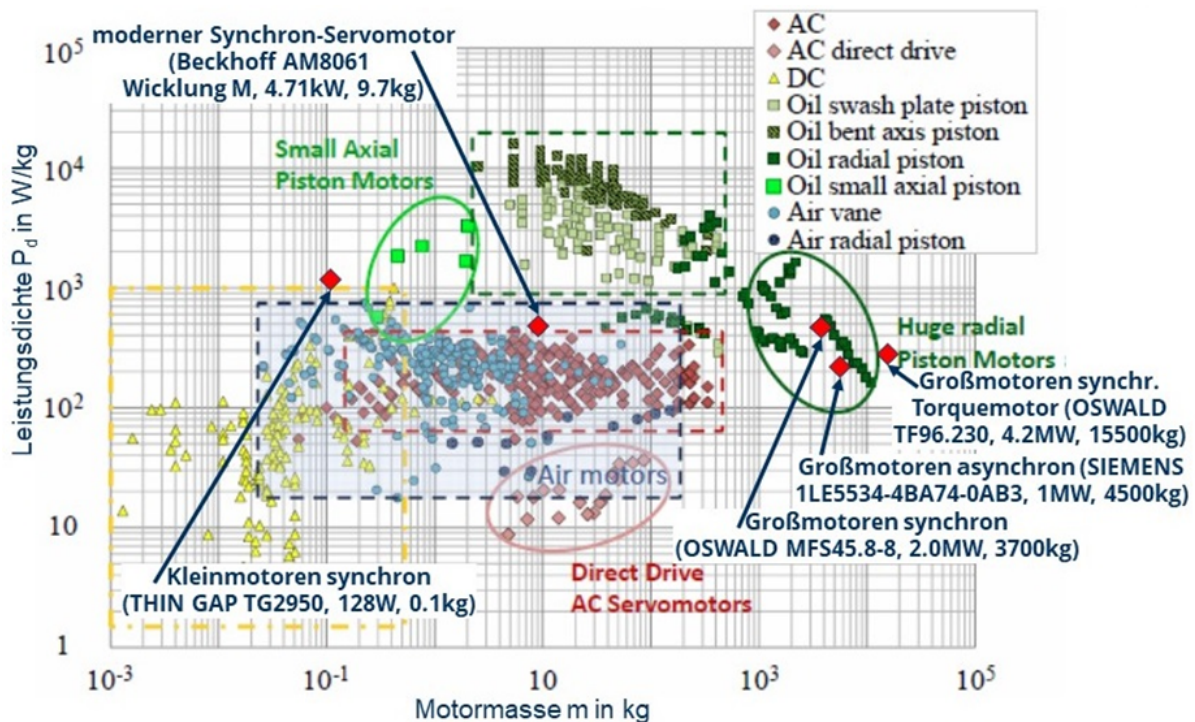
3.6.4 Vergleich der Leistungsparameter Hydraulik – Pneumatik – Elektromechanik – Direktantriebe

Um ökologisch und wirtschaftlich sinnvolle neue Lösungen für Antriebsaufgaben zu finden, ist ein Vergleich der technischen Möglichkeiten sinnvoll. Die technische Lösung der geforderten Antriebsaufgabe stellt die Basis für einen möglichen Einsatz einer Technologie dar. Die Erfüllung der Leistungsanforderungen ist dabei ein wichtiger Faktor. Für die Einteilung in rotatorische und translatorische Arbeitsaufgaben nach Abbildung 6, Seite 37 werden die aktuellen Leistungsgrenzen der Technologien anhand einer Marktrecherche analysiert und Überschneidungsbereiche der Technologien abgeleitet.

3.6.4.1 Rotatorische Aktoren

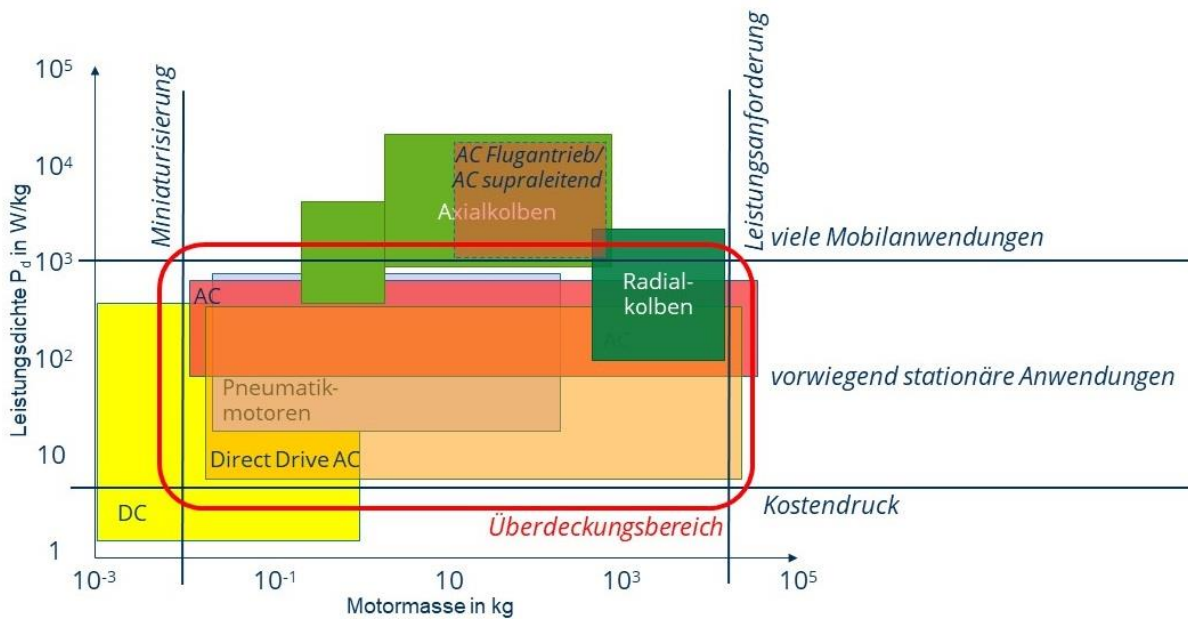
Die auf die Masse bezogene Leistungsdichte ist das am besten zugängliche Kriterium zum Leistungsvergleich verschiedener Antriebssysteme. Dies gilt in besonderem Maße für Mobilanwendungen. Ein volumenbezogener Vergleich der spezifischen Antriebsleistung ist zwar möglich, aber wegen der verschiedenen Bauformen bzw. Einbausituationen – insbesondere des jeweiligen Motordurchmessers – nur für spezifische Vergleiche aussagekräftig. Hervorzuheben ist die bei hydraulischen und pneumatischen Systemen vorliegende räumliche Trennung von Energiewandlung (Pumpe bzw. Kompressor) und Antrieb. Folglich erreichen insbesondere hydraulische Systeme (hinreichendes Druckniveau vorausgesetzt) die größte, auf den Aktor (masse)bezogene Leistungsdichte.

Eine 2013 von Tanaka veröffentlichte Studie zu den Charakteristika rotatorischer hydraulischer, pneumatischer und elektrischer Antriebe (Tanaka et al., 2013) wurde anhand von Datensätzen exemplarisch ausgewählter elektrischer Antriebe mit hoher Leistungsdichte ergänzt, um den aktuellen Stand der Technik abzubilden. **Abbildung 33** zeigt die Leistungsdichte in W/kg für verschiedene Motoren aufgetragen über deren Motormasse in Kilogramm. Elektrische Antriebe erreichen mit ca. 500-1000 W/kg Leistungsdichten von großen Radialkolbenmotoren. Es zeigt sich zudem, dass große (schwere) Torquemotoren prinzipiell große Hydraulikmotoren (> 1000 kg Motormasse) ersetzen können. Letztlich bleiben aber kompakte Hydraulikmotoren im Bereich 10-1000 kg Motormasse bzgl. der Leistungsdichte überlegen, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass für die Leistungsanpassung von Elektromotoren typischerweise ein zusätzliches Getriebe notwendig ist.

Abbildung 33: Leistungsdichte (bezogen auf die Nennleistung) und Masse von Rotationsantrieben

Quellen: (Tanaka et al., 2013), erweitert anhand eigener Recherchen des IMM

Große Motoren werden in der Regel speziell für die jeweilige Antriebslösung entworfen. Dabei sind meist Kriterien wie die Einpassung in den vorhandenen Bauraum oder eine möglichst hohe Leistungsdichte (Mobilanwendungen) entscheidend. Der Faktor Energieeffizienz kann als Substitutionsmerkmal nicht untersucht werden, da bei Anwendungen mit großen Motoren (>1000 kg) die Erfüllung der technischen Aufgabe im Vordergrund steht. **Abbildung 34** zeigt den aus der Marktanalyse identifizierten Bereich in dem Motoren mit vergleichbaren Leistungsdaten verfügbar sind und somit für eine Substitution grundsätzlich in Frage kommen. Gegenüber **Abbildung 33** wurden Drehstrom-Flugantriebe (AC-Flugantriebe) und supraleitende Elektromotoren (AC-supraleitend) in das Schema aufgenommen, um das Entwicklungspotenzial elektrischer Antriebe aufzuzeigen. Bis zur Marktreife, insbesondere von supraleitenden Elektromotoren, bzw. dem Aufschließen von industriell eingesetzten Antrieben in den Leistungsbereich der AC-Flugantriebe wird nach Auffassung der Autoren noch mindestens ein Jahrzehnt vergehen.

Abbildung 34: Überdeckung der massebezogenen spezifischen Leistung für pneumatische, hydraulische und elektrische Rotationsantriebe (basierend auf Abbildung 33)

Quelle: eigene Darstellung IMM

Grundsätzlich lässt sich der Überdeckungsbereich für hydraulische und pneumatische rotatorische Antriebe hin zu kleinen Massen durch die Anforderung der Miniaturisierung ($<0,1$ kg) und bzgl. geringer Leistungsdichten (<10 W/kg) abgrenzen. Bzgl. hoher Leistungsdichten oberhalb von 1000 W/kg kommen praktisch nur Hydraulikmotoren in Frage. Oberhalb von 10 t Eigenmasse sind nur noch Kleinstserien oder Einzelanfertigungen relevant, die jeweils spezifisch auf die Anwendung hin optimiert werden.

Insgesamt betrachtet ergibt sich ein überschaubarer Bereich der Überschneidung rotatorischer hydraulischer und elektrischer Antriebe. Dies betrifft vor allem den Bereich stationärer Anlagen, wobei aber die Peripherie und weitere Randbedingungen berücksichtigt werden müssen (Bereitstellung des Druckmediums, technische Anforderungen bspw. bzgl. Robustheit und Sicherheit gegen Überlast). In mobilen Maschinen ist eine Substitution von Hydraulikmotoren an den Übergang zu alternativen Antriebskonzepten gekoppelt. So lange die zentrale Energiebereitstellung mechanisch (Verbrennungskraftmaschine) erfolgt, bleibt der Einsatz elektrischer Fahrtriebe wahrscheinlich unwirtschaftlich.

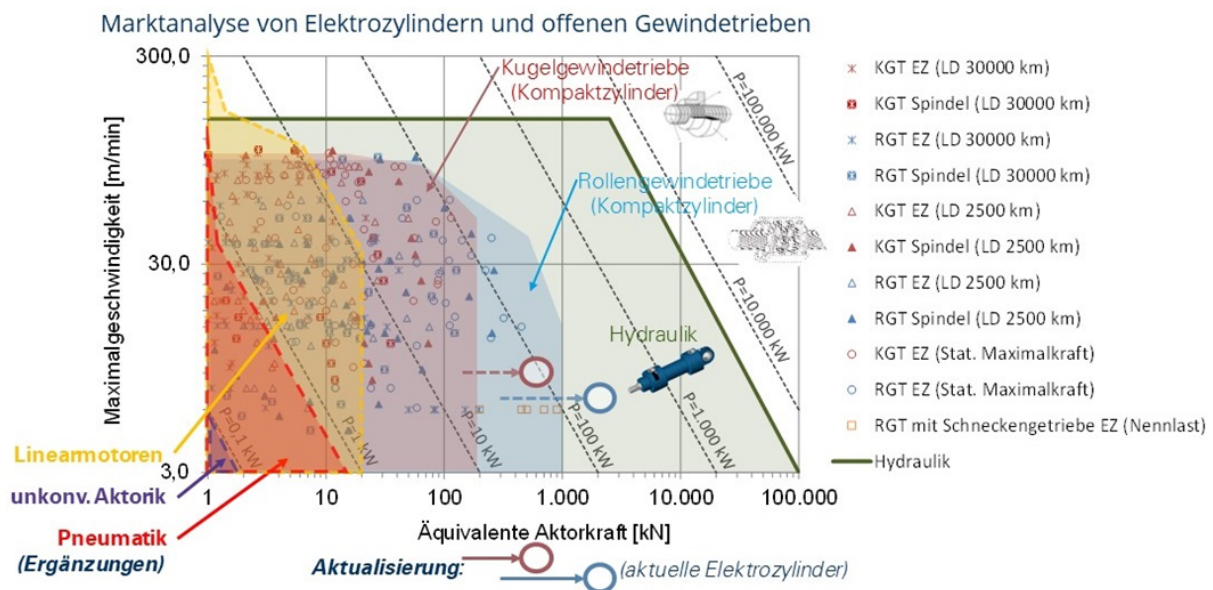
Pneumatikmotoren (bspw. als Zahnrad- oder Lamellenmotoren) können bzgl. der Leistungsdaten weitgehend durch elektrische Antriebe substituiert werden, kommen aber selten zum Einsatz. Weitere technologische Hürden wie die Einsatzmöglichkeit in explosionsgefährdeten Umgebungen schränken das Substitutionspotential weiter ein.

3.6.4.2 Linearaktoren

Die Leistungsgrenzen von Linearaktoren lassen sich anhand der möglichen Vorschubgeschwindigkeiten und Kräfte aufzeigen. Hierfür wurde eine von Michel durchgeführte Recherche (Weber & Michel, 2012) aus dem Jahr 2012 exemplarisch um aktuelle elektromechanische Zylinder erweitert, um den aktuellen Stand der Technik abzubilden (siehe **Abbildung 35**). Ergänzend wurden die geschätzten Kraft- und Leistungsbereiche von Linearmotoren, unkonventionellen Aktoren sowie pneumatischen Linearantrieben (Pneumatikzylinder) basierend auf den in **Abbildung 36** und in **A.1** aufgeführten Daten in die Übersicht aufgenommen. Auf eine Erweiterung des Diagramms um den Bereich <1 kN Aktorkraft

wurde verzichtet. In diesem Bereich sind prinzipiell alle aufgeführten Antriebstechnologien einsetzbar, was die Überdeckung der Geschwindigkeits- bzw. Leistungsbereiche bei 1 kN zeigt.

Abbildung 35: Leistungsdaten elektromechanischer und hydraulischer Linearantriebe



Quellen: (Michel, 2012), erweitert anhand eigener Recherchen IMM

Hydraulische Linearantriebe sind bei hohen Leistungsanforderungen und Kräften allen anderen Antrieben überlegen. Der technisch mögliche Bereich für den Einsatz elektromechanischer Linearantriebe kann etwa auf Leistungen <100 kW und Kräfte <1000 kN eingegrenzt werden. Moderne Elektrozyklinder verfügen vereinzelt auch über Leistungen- und Kräfte oberhalb dieser Grenzen. Bei elektromechanischen Linearantrieben ist die Auslegung bzgl. der Lebensdauer (LD) in Kilometern akkumuliertem Hub unbedingt zu beachten (Angaben zur Lebensdauer LD in der Legende in **Abbildung 35**). Je nach Anforderung, insbesondere der Ausnutzung und Belastung des Antriebs, ergibt sich damit in **Abbildung 35** eine mehr oder weniger breite Überdeckung der Kraft- und Leistungsbereiche. Häufig ist bei den typischerweise eingesetzten Elektrozyklindern der Motor ein leistungsbeschränkender Faktor, so dass die von den mechanischen Komponenten ertragbare Spitzenlast bzw. -kraft nicht ausgenutzt werden kann. KGT- und RGT-Antriebe können mit zusätzlichen Getriebestufen in einem weiten Bereich von Vorschubgeschwindigkeit und Kraft anforderungsspezifisch angepasst werden.

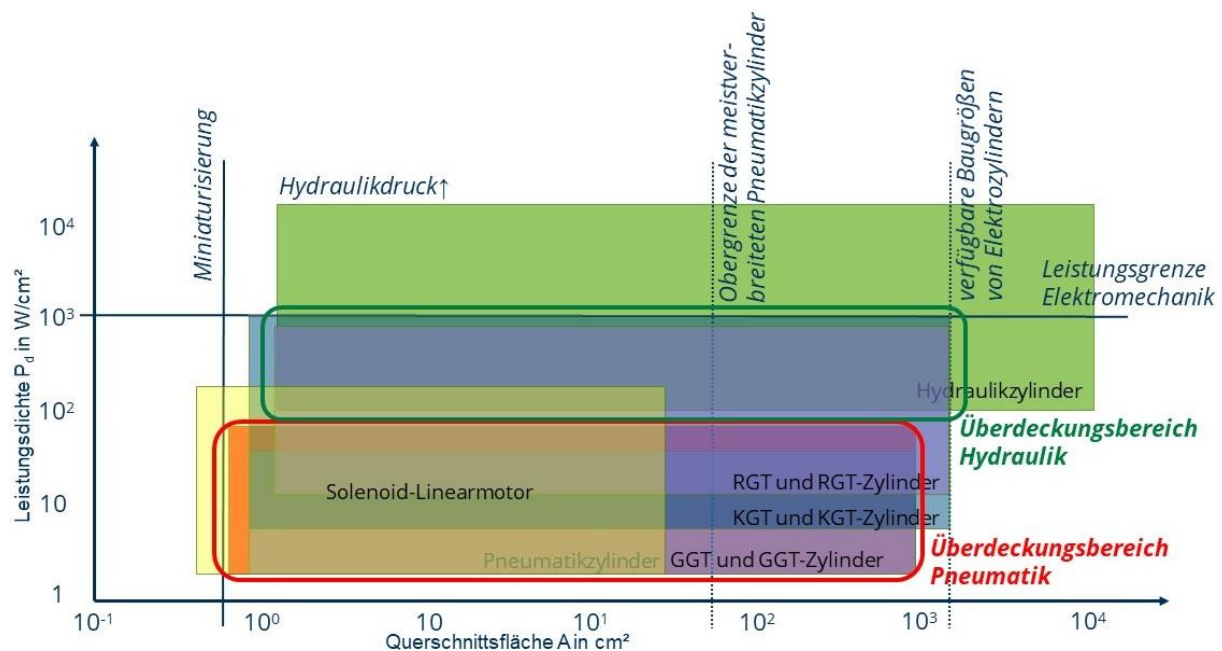
Pneumatische Zylinderantriebe liegen in einem Kraft- und Leistungsbereich der durch elektromechanische Linearantriebe (bspw. Elektrozyklinder mit Gleitgewindetrieb (GGT), mit Kugelgewindetrieb (KGT) und Rollengewindetrieb (RGT)) sowie Linearmotoren und bei kleinen Leistungen prinzipiell auch durch unkonventionelle Aktoren abgedeckt wird. Bezogen auf die absolut erreichbaren Kräfte und Leistungen können pneumatische Linearantriebe in einem weiten Bereich durch direktelektrische, elektromechanische, hydraulische und zukünftig ggf. auch unkonventionelle Aktoren ersetzt werden.

Neben erreichbaren Geschwindigkeiten und Kräften ist der Bauraum ein entscheidendes technisches Kriterium bei der Aktorwahl. Da das Volumen des Antriebs bei direktelektrischen und elektromechanischen Antrieben stark von der Bauform und Kombination von Elektrozyklinder und Motor abhängt, erfolgt der Vergleich auf Basis der Querschnittsfläche am Flansch der Aktoren. Die Anordnung des Motors bei Elektrozyklindern sowie die Baulänge und Masse des Antriebs bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt und können bei gleichem Hub stark variieren. Es ist davon auszugehen, dass bei gleichem Hub Hydraulik- und

Pneumatikzylinder kürzer bauen als vergleichbare Elektrozyylinder. Der Vergleich auf Basis der Zylinder-Querschnittsfläche erfolgt stellvertretend für äußerlich ähnliche Bauformen und zwar Hydraulik-, Pneumatik- und Elektrozyylinder sowie Solenoid-Linearmotoren (zylinderförmige Bauweise). Die ausführliche Herleitung des flächenbezogenen Vergleichs ist im Anhang (siehe **A.1**) aufgeführt. Ebenda wird auch ein Vergleich der massebezogenen Leistungsdichte der Antriebssysteme durchgeführt, welcher aufgrund der begrenzten Datenlage nur als grobe Orientierung dienen kann und daher in diesem Abschnitt nicht weiter behandelt wird.

Analog zu **Abbildung 34** sind in **Abbildung 36** die Linearantriebstechnologien vergleichend bzgl. ihrer Leistungsdichte, hier aber bezogen auf die Querschnittsfläche der Aktoren, eingeordnet. Zur Berechnung der Querschnittsfläche wird – ungeachtet ob der Flansch des jeweiligen Zylinders kreisförmig oder quadratisch ist – der in die jeweilige Flanschfläche größtmöglich einschreibbare Kreis herangezogen. Für die Abschätzung der Leistungsbereiche werden für die direktelektrischen und elektromechanischen Antriebe jeweils hohe und geringe Auslastungen bzgl. der Aktorkraft betrachtet. Elektrozyylinder sind nur bis zu einer bestimmten Baugröße verfügbar. Darüber hinaus werden größere Gewindetribe bis 240 mm Spindeldurchmesser einzeln angeboten, womit anwendungsspezifische Großantriebe zusammengestellt werden können.

Abbildung 36: Überdeckung der flächenbezogenen (auf die Flanschfläche) spezifischen Leistung für pneumatische, hydraulische und elektrische Linearantriebe (vgl. Anhang A.1)



Quelle: eigene Darstellung IMM

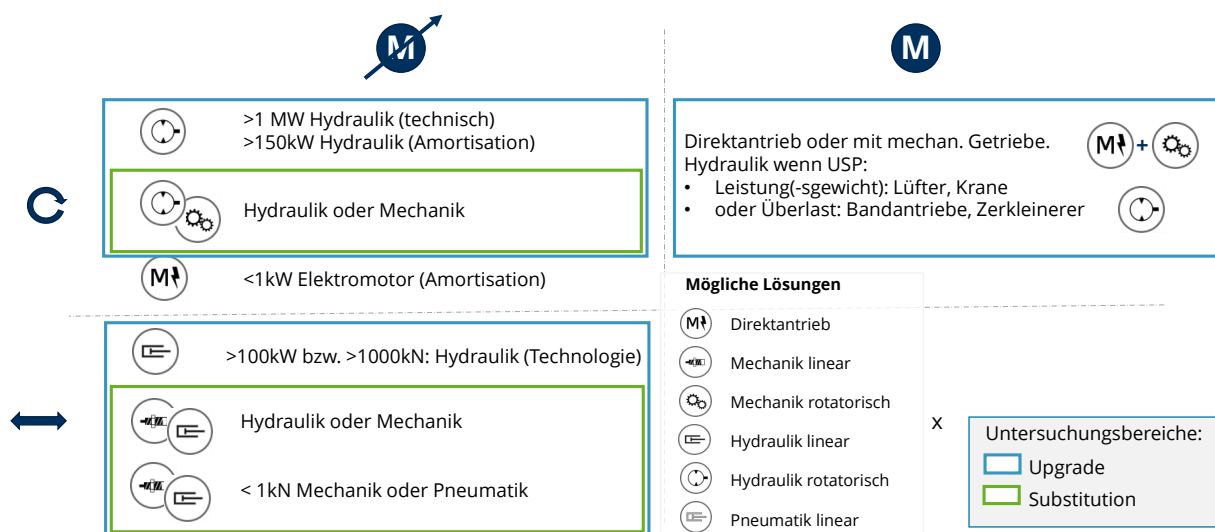
Bis ca. 100 W/cm^2 konkurrieren pneumatische Antriebe mit elektromechanischen (teils auch elektrischen Direktantrieben). Darüber bis ca. 1000 W/cm^2 konkurrieren hydraulische Zylinderantriebe mit elektromechanischen Antriebslösungen. Im Hochlast- und Hochleistungsbereich sind – wie bereits in **Abbildung 35** ersichtlich – hydraulische Linearantriebe kaum zu ersetzen. Die in der Regel etwas geringere Leistungsdichte der Elektromechanik kann bei stationären Anwendungen oftmals hingenommen werden, da die Eckleistung meist nicht oder nur kurz benötigt wird. In Konsequenz entscheiden in diesem Bereich andere Merkmale, wie ein zentrales Versorgungsaggregat oder der Vorteil dezentraler Lösungen, über den Technologieeinsatz. Hydraulische Kompaktachsen wurden hier nicht betrachtet. Sie sind prinzipbedingt bzgl. ihrer Leistungsdaten vergleichbar mit Elektrozyindern, können aber über die freie Wahl der Übersetzung beliebig große Kräfte oder große

Geschwindigkeiten erzeugen. Pneumatische Linearantriebe können technisch in einem breiten Einsatzfeld durch elektromechanische und elektrische Antriebe ersetzt werden. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist dabei die aktuell längere Amortisationszeit der elektrischen Linearachsen. Allgemein ergeben sich bei einem masse- oder volumenbezogenen Vergleich der Leistungsdaten abweichende Verhältnisse, die aber im begrenzten Rahmen dieser Studie nur als grobe Orientierung (massebezogener Vergleich in A.1), bzw. wegen der vielfältigen Bauformen gar nicht (volumenbezogener Vergleich), behandelt werden können.

3.6.5 Auswertung der Wettbewerbssituation

Überschneidungsbereiche der Technologien rotatorischer und linearer Aktoren sind in **Abbildung 37** zusammengefasst.

Abbildung 37: Überschneidungsbereiche der Technologien



Quelle: eigene Darstellung IMM

Der Technologievergleich für Antriebe mit fester Drehzahl ergibt, dass dort keine oder nur geringe Substitutionspotentiale bestehen. Hydraulikmotoren werden dann eingesetzt, wenn ein geringes Leistungsgewicht erforderlich ist oder Momente einfach begrenzt werden müssen. Die Anwendungen sind spezifisch, weshalb hier keine detaillierte Analyse stattfindet.

Im Bereich variabler Drehzahlen mit rotatorischem Antrieb gibt es einen großen Bereich der Überschneidung von hydraulischen und mechanischen Lösungen. Antriebslösungen über 1 MW Leistung werden dabei hydraulisch ausgeführt, da Umrichtertechnologien für diesen Leistungsbereich schlecht verfügbar sind. Über 150 kW ist die Umrichtertechnik heute sehr teuer, weshalb drehzahlvariable Antriebe in diesem Bereich nicht in der Breite zur Anwendung kommen. Deshalb werden sie in dieser Untersuchung nicht detailliert betrachtet.

Bei Linearantrieben gibt es eine Konkurrenzsituation zwischen hydraulischen und elektromechanischen Antrieben im Bereich bis ca. 1000 kN Spitzenkraft und 100 kW Spitzenleistung. Dort konkurrieren elektromechanische Linearantriebe, als Rollengewindetriebe (RGT) oder Kugelgewindetriebe (KGT) ausgeführt, mit Hydrozylindern. Im Kraftbereich unter 1 kN werden weniger hydraulische Antriebe eingesetzt. Hier gibt es eine Konkurrenzsituation zwischen Gewindetrieben, Linearmotoren und Pneumatikzylindern, besonders ausgeprägt im Bereich der Bewegungen zwischen zwei Endlagen. Pneumatische und elektromechanische Aktoren können in den meisten Anwendungen für Punkt-zu-Punkt Bewegungen eingesetzt

werden, rotatorisch wie translatorisch. Ein anwendungsbezogener Vergleich wird in **Abschnitt 4.1.3** durchgeführt.

3.7 Zusammenfassung

Zur Einsparung von Energie wurden verschiedene potentielle Maßnahmen auf der Ebene von Komponenten, Systemarchitekturen, der Systemsteuerung oder dem Einsatz alternativer Technologien auf der Basis einer grundsätzlichen technischen Machbarkeit vorgestellt. Für die Auswahl eines Antriebs sind darüber hinaus aus technologischer Sicht weitere Kriterien zu bewerten, was nur anwendungsspezifisch erfolgen kann.

Im Bereich der pneumatischen Antriebstechnik wurden Einsparpotentiale in drei verschiedenen Kategorien ermittelt. Austausch und Verbesserung von Komponenten bieten geringes Potential für die Einsparung von Energie. Der Einsatz von direkteletrischen bzw. elektromechanischen Antrieben anstelle von Pneumatikzylindern ist im Kraftbereich unter 1 kN technisch in vielen Fällen möglich. Eine dadurch erreichbare Energieeinsparung lässt sich jedoch nur anwendungsspezifisch bewerten. Mittleres Potential besteht durch Änderungen der Anlagentopologie: Der Einsatz von Energiesparschaltungen, die Einführung verschiedener Druckniveaus sowie eine ganzheitliche Betrachtung vom Kompressor bis zum Aktor können Energie einsparen. Das größte Einsparpotential besteht bei der Dimensionierung der Antriebe. Eine Umfrage (Hülsmann et al., 2020) zeigt, dass methodisches Know-How in der Praxis ein Hemmnis bei der energieeffizienten Auslegung pneumatischer Antriebssysteme ist. Die in den letzten 10 Jahren erforschten Methoden haben bislang wenig Einzug in die Praxis erhalten.

Die Auswertung der relevanten Literatur mit Bezug auf den Bilanzraum Deutschland lässt ein Einsparpotential in der Druckluftbereitstellung in Höhe von 20% bis 35% erwarten. Dies entspricht einer Energiemenge von 3,2 bis zu 5,6 TWh/a bzw. 1,3 bis 2,3 Megatonnen CO₂ in Deutschland. Das größte Einsparpotential in der Druckluftbereitstellung liegt in der regelmäßigen Beseitigung von Druckluftleckagen im gesamten Druckluftnetz und den Druckluftanwendungen. Maßnahmen wie die Netzdruckabsenkung, sowie die Vermeidung unnötiger Druckverluste sind oftmals nur mit geringem Zeit- und Materialaufwand verbunden und sind deshalb verhältnismäßig einfach umzusetzen.

In stationärhydraulischen Antrieben bestehen Einsparpotentiale im kleinen und mittleren einstelligen Bereich durch den Austausch von Elektromotoren und Komponenten durch neuere Fabrikate mit verbesserten Wirkungsgraden. Steuerungstechnisch können große Energieeinsparungen durch die temporäre Stillsetzung von Antrieben erschlossen werden. Dies ist jedoch stark anwendungsabhängig und unter Umständen auch von weiteren Faktoren wie z. B. der Temperierung der Maschine abhängig. Die größten Potentiale lassen sich durch das Update der Antriebsstränge der Maschinen erschließen. Hier liegen insbesondere im Ersatz ventilgesteuerter durch verdrängergesteuerte Systeme sowie im Einsatz dezentraler (verdrängergesteuerter) Antriebseinheiten große Potentiale. Beim Parallelbetrieb von Aktoren an zentralen Netzen können sich durch eine systematische Auslegung und die Anpassung von Aktoren und Druckniveau Energieeinsparungen erzielen lassen. Die Substitution hydraulischer Linearantriebe durch elektromechanische Gleitgewindetribe (GGT), Kugelgewindetribe (KGT) und Rollengewindetribe (RGT) ist im Kraftbereich bis 1000 kN Aktorkraft und 100 kW Spitzenleistung heute technisch möglich. Durch den Wechsel der Antriebstechnologie sind oftmals Energieeinsparungen möglich, die aber nur anwendungsspezifisch bewertet werden können.

Könnten im Bereich der hydraulischen Antriebstechnik Energieeinsparungen zwischen 10% und 20% umgesetzt werden, ist mit einer CO₂-Einsparung in Höhe von 0,4 Megatonnen CO₂ zu rechnen – rechnerisch dem CO₂-Ausstoß einer Stadt der Größe von Ravensburg (50.500 Einwohner, Durchschnitt 2019). Unter welchen Bedingungen die Einsparungen von den Unternehmen wirtschaftlich umgesetzt werden können ist zu anwendungsspezifisch, um hier allgemeingültig beantwortet werden zu können.

Mobilhydraulische Systeme aus Land-, Forst- und Bauwirtschaft verfügen über große Energieeinsparpotentiale durch die Bediener*innen. Enorme Einsparungen können durch die Stillsetzung von Maschinen durch Bediener*innen oder eine Start-Stopp-Automatik erreicht werden. Beim Einsatz neuer Hydraulik-Architekturen sind ebenfalls große Einsparpotentiale zu erwarten. Die Substitution hydraulischer Antriebe durch elektromechanische ist ohne den Ersatz des Verbrennungsmotors durch eine (erneuerbare) Elektroenergiequelle ökologisch nicht sinnvoll; technologisch sind elektrische Radantriebe dann vorstellbar. Für kleinere Maschinen ist der Einsatz elektromechanischer Linearantriebe technisch möglich.

Durch die Vermeidung von Leerlaufzeiten sowie den Einsatz der energetisch bestmöglichen Technologie sind im Bereich der Mobilhydraulik Energieeinsparpotentiale in Höhe von 15% bis 40% vorstellbar, was einer CO₂-Einsparung von 2,9 bis 7,6 Mio. t CO₂ pro Jahr entsprechen würde – rechnerisch einer Stadt der Größe Kölns als viertgrößte Stadt Deutschlands.

Heute kommen in hydraulischen Applikationen überwiegend mineralölbasierte Druckflüssigkeiten zum Einsatz. Dabei besteht der Konflikt zwischen dem Erhalt der Schmierfähigkeit bei höheren Temperaturen und der Höhe der Strömungsverluste bei hohen Viskositäten. Der Einsatz möglichst niedrigviskoser Flüssigkeiten sollte angestrebt werden, scheitert jedoch an der Angst der Verantwortlichen vor Systemausfällen. Energieeinsparungen sind insbesondere in stationärhydraulischen Anwendungen, in denen Betriebs- und Umgebungsbedingungen bekannt sind, möglich.

4 Einsparungsmöglichkeiten und Potentialbewertung

Die betrachteten Technologien Hydraulik, Pneumatik und Elektromechnik weisen kein generelles, disruptives Potential in dem Sinne, dass ein Technologieersatz bei besserer Performance oder deutlich geringeren Kosten erfolgen könnte, auf. Der Einsatz aller Technologien in bewährten industriellen Lösungen bestätigt dies. Bezüglich der in **Kapitel 3** beschriebenen Energieeinsparpotentiale gelten in jeder Anwendung (neben der Wirtschaftlichkeit) weitere technische Restriktionen, die sich maschinenabhängig deutlich unterscheiden können. Die Analyse der möglichen Einsparungen und ihre Bewertung muss also anwendungsspezifisch getroffen werden. Hierzu werden Anwendungen kategorisiert und diejenigen mit hohem Einsparpotential analysiert. Anhaltspunkte für quantitativ großes Einsparpotential sind Anwendungen mit großer installierter Leistung, langen Betriebszeiten einzelner Maschinen sowie eine große Stückzahl einer Maschinenkategorie.

4.1 Anwendungsbezogene Bewertung der Einsparpotentiale

4.1.1 Stationäre Anwendungen: Fördertechnik, Metallurgie, Pressen, Kunststoffmaschinen

Zahlreiche stationäre Hydraulikanwendungen sind im Sondermaschinenbau zu finden, wobei die Maschinen eine große Variabilität der Einsatzbedingungen aufweisen. Diese sind zum Beispiel:

- ▶ mehrere Aktoren unterschiedlicher Leistung,
- ▶ unterschiedliche räumliche Verteilung,
- ▶ Anforderungen an Gewicht und Leistungsdichte,
- ▶ notwendige Absicherung gegen Überlasten und
- ▶ Anforderungen hinsichtlich Dynamik und Positioniergenauigkeit.

Wichtige Umsatzgruppen im Bereich hydraulischer Antriebe sind die Bergbau- und Fördertechnik, Pressen, Kunststoff- und Werkzeugmaschinen und metallurgische Anwendungen.

Förderanlagen für die Bewegung von Schüttgütern über kurze oder lange Wege und kleine oder große Höhenunterschiede werden heute mit verschiedenen Technologien angetrieben. Dabei verfügen Antriebe mit mechanischem Getriebe über einen besseren Wirkungsgrad. Die Entscheidung über einen Einsatz der Technologie wird jedoch zumeist nicht aus energetischen Gründen getroffen. Wesentliche Anforderungen sind eine lange Lebensdauer, eine große Robustheit sowie bei Schaufelrädern auch das Gewicht, das durch die Tragstruktur gehalten werden muss. Für Bandantriebe ergeben sich einfache und langlebige Lösungen mit elektromechanischen Antrieben, welche mit konstanter Drehzahl über lange Zeiträume betrieben werden. Sobald weitere Anforderungen wie Überlast- oder Gewichtsforderungen hinzukommen, werden meist hydraulische Antriebe eingesetzt. Energie ist bei der Entscheidung kein wesentlicher Treiber, weshalb die Situation sich nach der aktuellen Studienlage nicht maßgeblich ändern wird.

In der Stahlindustrie werden hydraulische Antriebe insbesondere aufgrund ihrer Robustheit und der großen verfügbaren Kräfte in vielen Einzelantrieben eingesetzt. Daneben ist die räumliche Trennung von Energieerzeugung und Aktorik ein wichtiger Einsatzgrund für die Technologie. Bei der Installation von Nebenantrieben sind die Kosten nach Aussage der Betreiber das ausschlaggebende Kriterium, da diese oftmals geringe Betriebsdauern aufweisen

und die hydraulische Versorgung bereits installiert ist. Das Energieeinsparpotential ist bei **Nebenantrieben** gering. Eine aktuelle Untersuchung zum Ersatz von drei hydraulischen Antrieben in einem hydraulischen Großmanipulator ergab eine Amortisierungszeit der Anschaffungs-Mehrkosten von mehr als 50 Jahren. Der Ersatz der Technologie wird allerdings schnell rentabel, wenn Produktionsausfall vermieden werden kann.

Anlagenteile mit großem hydraulischen Energieumsatz sind die Kokillenoszillation in Gießereien sowie Spaltregelungen in Walzwerken.

Bei der **Kokillenoszillation** wird der flüssige Stahl in einen Schacht gegossen, dessen Wände mit einer Frequenz zwischen 2 und 5 Hz in kleinen Amplituden bewegt werden, damit der Stahl sich nicht mit der Wand verbindet. Hier werden hydraulische oder elektromechanische Antriebe für die Bewegung eingesetzt. Die Entscheidung für eine der Technologien ist nach Aussage der Betreiber jedoch durch das Know-How des Anlagenherstellers bedingt. Energetische Überlegungen werden dabei der Beherrschbarkeit der Technologie untergeordnet.

Spaltregelungen in Walzanlagen werden über Technologiekombinationen elektromechanisch und hydraulisch ausgeführt. Lastfreie Positionierungen mit großen Wegen werden dabei aufgrund der Steifigkeit über Gewindetribe vorgenommen, dynamische Verstellungen erfolgen mit hydraulischen Servoantrieben. Verdrängersteuerungen sind hier durch eine geringere Steifigkeit der Ventilsteuerung unterlegen. Es besteht kein Substitutionspotential.

Tiefziehpressen bestehen aus einem Stößel, der die Presskraft über den Pressenrahmen gegen ein Ziehkissen aufbringt. Ziehkissenantriebe haben dabei die Aufgabe dem Stößel eine genau definierte Last entgegen zu setzen. Hier ist aktuell neben hydraulischen Antrieben keine andere Technologie verfügbar. Stößelantriebe werden aktuell bis ca. 45.000 kN mechanisch ausgeführt. Im Bereich von Pressen mit variabler Hub-Kraftcharakteristik kommen in diesem Bereich zunehmend Servopressen zum Einsatz, bei denen große Motoren den Stößel ohne Schwungmasse über ein mechanisches Getriebe antrieben und somit die Presskraft ohne die Nutzung von Trägheitsmomenten oder nichtlinearen Übersetzungscharakteristiken übertragen. Ist der Einsatz servomechanischer Stößelantriebe möglich, so bietet er deutliches Energieeinsparpotential gegenüber hydraulischen Pendanten. Die hohen Kosten solcher Antriebe sind ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz der Technologie. Im Vergleich zu den Rekuperationsmöglichkeiten bei den Ziehkissenantrieben ist das Einsparpotential allerdings deutlich geringer. Mit dem Einsatz von Verdrängersteuerungen in Ziehkissenantrieben ließen sich sehr große Effizienzpotentiale erschließen. Die Patentsituation (vgl. Kapitel 3.3.3) verhindert hier aktuell eine Einführung der Technologie in den Markt.

Spritzgießmaschinen werden für die Herstellung von der überwiegenden Zahl urgeformter Kunststoffprodukte benötigt. Im Spritzgießprozess wird Kunststoffgranulat aufgeschmolzen und unter hohem Druck in ein Werkzeug mit einer Negativform gespritzt.

In China, Deutschland, Österreich und der Schweiz werden eine Vielzahl der weltweit produzierten Maschinen hergestellt, wobei China zahlenmäßig deutlich über 50% der weltweit produzierten Maschinen herstellt. Deutschland exportiert den überwiegenden Anteil der Maschinen (Produktion 2019: 7296 Stck, Exportquote 91%, Umsatz: 1,1 Mrd. Euro) (GENESIS-ONLINE, 2020). Der Spritzgießmaschinenbau ist eine der umsatzstarken Kunden fluidtechnischer Systeme und Komponenten.

In Kunststoffmaschinen wurden in den letzten 20 Jahren viele Erfahrungen im Wettbewerb von hydraulischen und elektromechanischen Antrieben gesammelt.

Seit Anfang der 2000er werden zunehmend elektromechanische Linearantriebe in Form von Kugelgewindetrieben für die linearen Bewegungen verwendet, die aktuell in kleinen und mittleren Maschinen weite Verbreitung finden. Maschinen mit elektromechanischer

Antriebstechnik weisen gegenüber dem Stand der Technik hydraulischer Antriebstechnik Einsparpotentiale auf. Die Entwicklung der vergangenen Jahre resultiert in einem vielfältigen modularen Angebot der Hersteller, das die Kombination elektromechanischer und hydraulischer Achsen auf den Maschinen ermöglicht. Im Bereich großer Maschinen über ca. 5.000 kN werden elektromechanische Antriebe heute selten eingesetzt, da die Lebensdauer elektromechanischer Linearantriebe deutlich von der Belastung abhängt. Die Grenzen der mechanischen Belastung sind dabei über die Pressung der Wälzkontakte sowie die Abfuhr der Wärmeenergie durch den notwendigen Mehraufwand aktuell begrenzt.

Die Energieeffizienz ist ein viel beworbenes Kriterium; in der Produktion von Kunststoffteilen sind ca. 3-5% der Kosten energetisch bedingt. Heute können Anwender*innen bei vielen Herstellern die vier Hauptantriebe einer Spritzgießmaschinen entsprechend der technologischen Notwendigkeit modular hydraulisch oder elektromechanisch konfigurieren. Geringe Einsparpotentiale bestehen über steigende Energiekosten oder deutliche Steigerungen der Leistungsfähigkeit bei Linearantrieben.

Rotatorische Antriebe zum Fördern und Aufschmelzen (plastifizieren) von Kunststoffgranulat sind in Form von Hydromotoren und elektromechanischen Getriebe- oder Direktantrieben verfügbar. Technologisch bestehen bei kleinen und mittleren Maschinen keine Hürden für den Einsatz von Elektromotoren. Insbesondere beim Antrieb der Plastifizierschnecke mit elektrischen High-Torque-Direktantrieben lässt sich über 20% Elektroenergie einsparen. Hemmnis für die Entscheidung ist ein großer Unterschied in den Anschaffungskosten des zusätzlichen Elektromotors. Ist ein hydraulischer Antrieb installiert, wird dieser während des Plastifiziervorgangs nicht benötigt, was die Amortisation eines zusätzlichen Elektroantriebs erschwert. Bei größeren Maschinen werden fast ausschließlich hydraulische Radialkolbenmotoren eingesetzt, die ähnliche Verluste aufweisen wie vergleichbare mechanische Getriebe zum Aufbringen der hohen Momente.

Papiermaschinen, energietechnische Anlagen (Umspannwerke, Turbinen, Windenergieanlagen), Stahlwasser-, und Schiffbau sowie Bahnstantriebe sind weitere Technologiezweige mit größeren Umsatzanteilen, die in dieser Studie nicht detailliert untersucht werden.

4.1.2 Mobile Anwendungen: Bagger, Radlader, Traktoren

Nach Angaben des VDMA im Jahr 2020 liegt im Bereich Landtechnik der deutsche Umsatzanteil am Weltmarkt mit 111 Mrd € bei ca. 8%, die Baumaschinen bei ähnlichem Weltmarktumsatz bei ca. 5%. Mit allein im Bereich Landtechnik und Baumaschinen beschäftigten knapp 70.000 Personen kann dieser Bereich einen großen Beitrag leisten, Energieeinsparpotentiale umzusetzen. Für mobile Maschinen ergibt die Marktanalyse, dass Bau- und Baustoffmaschinen die größte Menge an verkauften Einheiten bilden, in diesem Bereich sind die weitaus meisten verkauften Einheiten Bagger und Radlader, weshalb diese Maschinen hier betrachtet werden. Im Landtechnikmarkt werden weitaus weniger Einheiten verkauft. Bei Traktoren können grundlegende Betrachtungen für eine hohe Anzahl von Einheiten gemacht werden, weshalb auch diese auf das Potential von Energieeinsparungen untersucht werden. Bei mobilen Anwendungen aus dem Bereich der Förder-, Forst- und Kommunaltechnik ist das Produktspektrum so groß, dass hier nur grundlegende Betrachtungen Einzug finden können.

Baumaschinen lassen sich funktional in die Arbeitsausrüstung auf dem Oberwagen und den Fahrtrieb im Unterwagen trennen. Die Analyse von Substitutionspotentialen hydraulischer Antriebe durch elektromechanische Antriebe wird ausgehend von der an der Welle einer Verbrennungskraftmaschine abgegebenen mechanischen Energie durchgeführt.

Die **Arbeitsausrüstung** von Baumaschinen ist durch Linearantriebe gekennzeichnet, welche die Ausrüstung und zu bewegende Lasten heben und senken. Ein Ersatz von Elektrozyllindern ist

heute technisch im Bereich kleiner Kräfte mit dynamischen Bewegungen im Kraftbereich bis ca. 50 kN möglich. In den letzten Jahren vorgestellte Studien der Hersteller (N, 2019; Yanmar Co., Ltd, 2019) belegen dies. Bei den vorgestellten Modellen ist der lokal emissionslose Betrieb mit Batterien das Alleinstellungsmerkmal. Durch die begrenzte Kapazität bedingt werden elektromechanische Linearantriebe eingesetzt, weil diese einen geringeren Energiebedarf aufweisen. Emissionsmäßig ist dieses Produktsegment jedoch nicht relevant. Studien zum Carbon-Footprint solch batteriebetriebener Fahrzeuge liegen nicht vor.

Der Energiebedarf der **Unterwagen** von Baumaschinen wie Baggern und Radladern befindlichen Aktoren kann einen erheblichen Anteil am Gesamtenergiebedarf der Maschine haben. Elektromotorische Radantriebe stehen hier in Konkurrenz zu Hydromotoren und bieten mitunter bessere Energieeffizienzen. Bedingt durch die geringere Leistungsdichte im Vergleich mit Hydromotoren stellt der Bauraum aber ein Hemmnis dar. In mittleren Baugrößen sind Elektroantriebe aber heute bereits technisch möglich. Unter Kostenaspekten bewertet sind elektrische Antriebe im Unterwagen in den nächsten Jahren nicht zu erwarten, sofern der Antrieb als Verbrennungskraftmaschine ausgeführt ist. Im Sondermaschinenbau (z.B. Bergbau) gibt es dieselektrische Antriebe, dann jedoch nicht als Einzelradantriebe ausgeführt (N, 2020d).

Traktoren verfügen über einen vergleichsweise großen Fahranteil. Mit der Maschinengröße nimmt der Zuganteil zu, wobei Leistung für selbstfahrende Anbaugeräte über eine Zapfwelle mechanisch abgegeben wird. Batteriespeicher werden aufgrund der Energiedichte nur für kleine Traktoren sinnvoll sein (Bögel & Lindner, 2019). Dieselektrische Antriebe mit Batteriezwischenspeicher werden für die nächsten 10-20 Jahre als eine Lösung angesehen um Energiebedarf und Schallemissionen in größeren Geräten zu senken. Anbaugeräte werden heute vorwiegend mechanisch direkt angetrieben. Hydraulik kommt für Nebenantriebe zum Einsatz. Der Ersatz dieser Baugruppen in Anbaugeräten durch elektrisch angetriebene wird vorangetrieben, bedingt aber eine elektrische Versorgung. Eine lange Amortisierungszeit, die bei Traktoren ca. 10.000 Betriebsstunden beträgt (Geissler, 2006), sowie günstige Dieselpreise lassen eine Amortisierung heute noch nicht generell zu.

Der Ersatz von Verbrennungskraftmaschinen durch alternative Energiequellen der ein wichtiges Bewertungskriterium für das Einsatzpotential elektrischer Direkt- und Linearantriebe darstellt, ist nicht Gegenstand dieses Forschungsberichts. Alternativen Energiequellen wie Batterien oder Brennstoffzellen in Landmaschinen sind ein aktuelles Forschungsthema in der Bau- und Landmaschinenteknik.

4.1.3 Pneumatik-Anwendungen

Pneumatische und elektromechanische Aktoren weisen einen großen Überschneidungsbereich bezüglich der Leistungsdichte auf, rotatorisch wie translatorisch. Es liegen zahlreiche vergleichende Studien zur Energieeffizienz vor; größerskalige Analysen bezüglich des Gesamtenergieaufwands für Branchen wurden nicht durchgeführt.

Ergebnisse einschlägiger Studien (Agricola et al., 2005; EnEffAH - Projektkonsortium, 2012b; Hülsmann et al., 2019) zeigen, dass es nicht sinnvoll ist, allgemeine Aussagen zu Energieeffizienzen und Einsparpotentialen zu machen, da die Effizienz sehr stark vom Anwendungsfall abhängt. Wichtige Kriterien für die vorteilhafte Auswahl eines Aktors sind beispielsweise Haltedauer und Aktorkraft in der Endlage. Faktoren wie Positionierungsorte, Dynamik, und Investitionskosten sind weitere wichtige Kriterien für die Beantwortung der Frage, welche Technologie sinnvoll einzusetzen ist. Möglichkeiten zur vergleichenden Bewertung sind die Betrachtung der „Overall Lifecycle Costs“ LCC, oder die „Total Cost of

Ownership“ (TCO), welche allerdings von zahlreichen Faktoren abhängig ist, die sich nur unternehmensspezifisch klassifizieren lassen.

Berchten und Ritz berechnen in einer vom Schweizer Bundesamt für Energie beauftragten Studie eine Energieeinsparung aus, die durch die Substitution der pneumatischen und hydraulischen Anlagen in der Schweiz erreicht werden können (Berchten & Ritz, 2006). Untersuchungsobjekte sind je ein Werk der Chemie-, Metall-, Nahrungsmittel-, Verpackungsindustrie. Die Ergebnisse basieren auf pauschalen nicht nachvollziehbaren Annahmen für Wirkungsgrade und -steigerungen von Anlagen, die aus technischer Perspektive nicht begründet werden und deren Herkunft nicht belegt ist.

Zhang stellt die Lebenszykluskosten von insgesamt 6 Achsen gegenüber und kommt zu dem Schluss, dass die Gesamtumweltkosten dieser vorgestellten pneumatischen Schaltungen auf die Umwelt geringer sind (Y. Zhang & Cai, 2014). Die Aussage gilt für die betrachteten Schaltungen.

Merkelbach und Eßer (Merkelbach & Eßer, 2015) kommen zu dem Schluss, dass bei kurzen Zykluszeiten ohne Lasthalten elektromechanische Antriebe deutlich energieeffizienter arbeiten als pneumatische Systeme. Bei der Berechnung der Lebenszykluskosten sind für eine Abschreibungsdauer von 5 Jahren die betrachteten pneumatischen Antriebe immer günstiger. Auch diese Aussage ist nur für die Klasse der betrachteten Antriebe und Bewegungsaufgaben gültig.

Merkelbach liefert eine Beispielbetrachtung zum Carbon-Footprint eines Pneumatikzylinders (Durchmesser 32 mm, Hub 200 mm, 2000 h Betriebszeit/Jahr mit 400 Zyklen Point-to-point/h, 5 Jahre Betrieb)(Merkelbach, 2020). In seinem Beispiel entstehen mehr als 90% der Treibhausgase während des Betriebs. Der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung des Bauteils ist somit hier von untergeordneter Bedeutung.

Der Auszug der vorgestellten Arbeiten zeigt die Diversität der Betrachtungen und der unterschiedlichen Schlüsse, die in Abhängigkeit des Anwendungsfalls und der Randbedingungen gezogen werden.

Anhand von Umfragen und Studienergebnissen lassen sich, unabhängig vom Anwendungsfall, wichtige Hemmnisse für die energieeffiziente Anwendung pneumatischer Antriebe ausmachen:

- ▶ Die Betrachtung der Energieeffizienz wird heute in den Unternehmen nicht ausreichend priorisiert, daraus entstehenden Mehrkosten werden selten analysiert.
- ▶ Viele Antriebssysteme sind auf geringe Anschaffungskosten optimiert, obwohl die Energiekosten diese oftmals deutlich übersteigen.
- ▶ Amortisationszeiten und reale Betriebsdauern weichen signifikant voneinander ab. Die Lebensdauer beeinflusst aber die CO₂-Bilanz maßgeblich.

4.2 Bewertung und Ranking der Einsparpotentiale

Die mögliche Höhe der Energieeinsparungen ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- ▶ *lange Maschinenlebensdauer* – je länger die Maschinenlebensdauer desto lohnenswerter die Maßnahme;
- ▶ *(tägliche) Einschaltdauer* – eine lange Einschaltdauer bedeutet eine Vervielfachung der Effekte;
- ▶ *Leistung* – je größer die Maschinenleistung desto größer die absolute Einsparung;

- ▶ *Verbreitung der Maschinenart* – viele Maschinen gleicher Bauart skalieren den Einspareffekt;
- ▶ *prozentuale Einsparung durch die Maßnahme* und
- ▶ *Zeit bis zur Umsetzung der Maßnahme* – eine schnelle Realisierung lässt die Einsparungen früher beginnen und damit anteilig länger wirken.

Über eine Methodik zur Bewertung des Energiesparpotentials wird im Folgenden ein qualitatives Ranking der Maßnahmen hinsichtlich der zu erwartenden Energieeinsparungen erstellt.

4.2.1 Methodik zur Potentialbewertung

Für die Bewertung von Einsparpotentials wird die die „Quality Function Development“-Methode (QFD) genutzt. Die Methode ermöglicht es in zwei Schritten eine Bewertung verschiedener Optionen gegeneinander vorzunehmen, wenn keine quantitative Bewertung der Kriterien möglich ist.

Im ersten Schritt werden die Bewertungskriterien nach ihrer Bedeutung geordnet, indem die erste Spalte mit jedem Kriterium der ersten Zeile gegeneinander mit den Kriterien 0 (weniger wichtig als), 1 (gleich wichtig wie) und 2 (wichtiger als) abgewogen werden. Für die in Kapitel 4.2 genannten Kriterien wird dies mit einer Matrix vorgenommen, wobei die Daten in der linken unteren Hälfte reziprok eingetragen werden (**Tabelle 14**).

Tabelle 14: Bewertungstabelle zur QFD-Analyse der Energiesparmaßnahmen

Kriterien	lange Lebensdauer	Einschalt-dauer	Einspa-rung	Verbrei-Tung	Leis-tung	schnelle Realisierung	Σ	Prozent
lange Lebensdauer		1	1	0	1	2	5	17
Einschaltdauer	1		1	1	1	2	6	20
Einsparung	1	1		1	1	2	6	20
Verbreitung	2	1	1		2	1	7	23
Leistung	1	1	1	0		1	4	13
schnelle Realisierung	0	0	0	1	1		2	7

In einem zweiten Schritt wird eine Punktbewertung der einzelnen Energiesparmaßnahmen bezüglich der Kriterien vorgenommen. Dabei werden zwischen 0 und 5 Punkten für die Kriterien wie folgt vergeben:

- ▶ lange Maschinenlebensdauer: 0: <1 Jahr bis 5:>15 Jahre;
- ▶ hohe Einschaltdauer: 1: <10% bis 5:>90%;
- ▶ große Einsparung: 1:<5%, bis 5: >20%;
- ▶ große Verbreitung: 1:<1 Anlage/Jahr bis 5: Massenindustrie;
- ▶ große Leistung: 0:<5kW bis 5:>1 MW;
- ▶ schnelle Realisierung: 0: >15 Jahre, 5: <1 Jahr.

Anhand der Kriterien können die Energiesparmaßnahmen bewertet und gerankt werden.

4.2.2 Bewertung möglicher Energieeinsparungen nach Branchen und Anwendungen

Eine technologieweite Bewertung von Maßnahmen scheitert an der Vielfältigkeit der Applikationen. Nach Vorstellung der technologischen Möglichkeiten in Kapitel 3 erfolgt nun eine Bewertung anhand konkreter, wirtschaftlich und energetisch wichtiger Anwendungen aus Kapitel 2.3. beispielhaft.

Das Ergebnis der Einzelbewertung der Energiesparmaßnahmen zeigt **Tabelle 15**. Mit angegeben sind die Maßnahmen-Kategorien:

- ▶ Regelungs- und Steuerungstechnische Maßnahme (RST),
- ▶ Upgrade (U),
- ▶ Substitution (S);

sowie der Anwendungsbereich:

- ▶ Pneumatik (P),
- ▶ Stationärhydraulik (SH) und
- ▶ Mobilhydraulik (MH).

Das Ranking der Einsparmaßnahmen ergibt sich aus den im Anhang dargestellten Einzelbewertungen.

Tabelle 15: Ranking der anwendungsbezogenen Einsparmaßnahmen

Dargestellt ist die Zusammenfassung der individuellen Bewertungen. Es handelt sich dabei um eine teilweise subjektive Einschätzung des energetischen Potentials verschiedener Maßnahmen. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen nicht pauschal vorgenommen werden.

Kategorie	Maßnahmen	Anwendungen	Ergebnis Punktbewertung	Quellen
RST	Support bei energieeffizienter Systemauswahl	P	4,8	(Agricola et al., 2005)
U	Tiefziehpressen - Verdrängersteuerung im Ziehkissen	SH	4,5	(Lohse et al., 2015a)/(Kohno & Somukawa, 2014)/(Lohse et al., 2015a)
RST	Bagger-Radlader: Vermeidung von Leerlauf	MH	4,4	(Fecke, 2018)
RST	zustandsorientierte Wartungskonzepte (Schläuche, Filter, ...)	SH, MH	4,3	(Smith, 2012)/(Leutenegger et al., 2018)
S	Rotationsantrieb Schnecke SGM	SH	4,3	
U	Anpassung der Druckmedien / Viskositätsklasse	SH	4,2	(S. N. Herzog et al., 2009)/(Bock et al., 2018)/(S. Herzog & Gregg, 2008)/(Dustman, 2006) / (Markus Scherer et al.,

Kategorie	Maßnahmen	Anwendungen	Ergebnis Punktbewertung	Quellen
				2004)/(Placek et al., 2003)/(Alibert & Schimmel, 2012)/(Neveu et al., 2008)/
U	Einsatz Energiesparschaltungen /Nutzung Expansionsenergie	P	4,2	(Hepke, 2017)/(Boyko, 2020)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
U	Spritzgießmaschinen - Umstellung auf Verdrängersteuerung	SH	4,1	(Helbig, 2007)/(Willkomm et al., 2014)/
U	regelmäßig Wartung der Druckluft-Aufbereitung	P	4,1	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
U	Beseitigung von Leckagen im Netz	P	4,1	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Agricola et al., 2005)
S	mechanische Tiefziehpressen anstelle hydraulischer	SH	4,0	
U	Bagger/Radlader: Individualisierung Ventil- und Pumpenstrukturen	MH	3,9	(Lübbert, Sitte, & Weber, 2016)/(Rahmfeld & Weber, 2004)/(Finzel, 2011)/(Eriksson et al., 2007)/(Karvonen, 2016)/(Inderelst, 2013)/(Inderelst, 2014)/(Zimmerman et al., n.d.)/(Martin Scherer, 2015)/(S. Zhang et al., 2017)/
U	korrekte Dimensionierung der Druckluft-Leitungen	P	3,9	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
U	Einsatz von Kompressoren mit Wärmerückgewinnung	P	3,9	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
RST	Peak-shaving: Reduzierung Spitzenlasten (elektromechanische Pressen, Stanzeinrichtungen)	SH	3,8	(Ristic & Wahler, 2018)/(Putz & Blau, 2016)
RST	übergeordnete Kompressorsteuerungen	P	3,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
U	Umstellung von IE1 auf IE3/4 Motoren	SH	3,7	(DIN EN 60034-30-1, 2014, pp. 60034-30–31)
U	Einsatz teillasteffizienterer Pumpenkonzepte	SH	3,7	(Willkomm et al., 2014)/(Green et al., 2018)
U	technisch korrekte und bedarfsorientierte Kompressorauslegung	P	3,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Agricola et al., 2005)/(Dindorf, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
RST	Netzdruckabsenkung	P	3,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium,

Kategorie	Maßnahmen	Anwendungen	Ergebnis Punktbewertung	Quellen
				2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
S	mech. Linearantrieb Spritzeinheit SGM	SH	3,5	
S	mech. Linearantrieb Schließereinheit SGM	SH	3,5	
U	Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren	P	3,5	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Dindorf, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
U	Hybridisierung Bagger/Radlader (+Betriebspunktoptimierung)	MH	3,4	(Schneider et al., 2016)/(Brun et al., 2015)/(Ge et al., 2017)
RST	bedarfsgerechte Steuerung von Nebenverbrauchern	SH; MH	3,3	(Steinert, 2013)/(Shabi, 2020)
S	Fahrertriebe	MH	3,3	(Schröter et al., 2014)
S	kleine, dezentrale Vakuumpumpen	P	3,3	(N, 2020c)/(Schmalz, 2020)/(EtaOpt, 2020)
U	Reduzierung der Aufbereitung der Druckluft	P	3,3	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
RST	Reduzierung Verluststellen beim Entwurf	alle	3,2	
U	Austausch von Trocknern in Pneumatiksystemen	P	3,1	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
S	mech. Kokillenzillation	SH	3,1	
S	mech. Getriebe in Förderanlagen	SH	3,0	
U	aktive Regelung von Nebenverbrauchern	MH, SH	2,9	(Shabi, 2020)/(Steinert, 2013)
U	Lösungen für elektrische Primärversorgung	MH	2,8	(Yoon et al., 2013)
U	Dimensionierung von Aufbereitungskomponenten	P	2,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
RST	optimierte Bewegungsprofile einstellen	P	2,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
U	bewegte Massen minimieren/ Reibung verringern	P	2,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
U	Dimensionierung des Leitungsnetzes	P	2,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium,

Kategorie	Maßnahmen	Anwendungen	Ergebnis Punktbewertung	Quellen
				2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
S	Einsatz von Vakuumpumpen statt Ejektoren	P	2,7	(N, 2020c)
S	Arbeitshydraulik Kleinbagger	MH	2,4	(N, 2019)

Es zeigen sich verhältnismäßig große Energieeinsparpotentiale im Bereich der Maßnahmen, die vom Know-How der Bediener*innen abhängen. Eine Unterstützung bei Systemauswahl und -entwurf hat hier besonders große Potentiale. Diese aus der Punktbewertung gewonnene Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen einer KFW-Befragung (Brüggemann, 2005) überein, die in Kapitel 5.2.1 im Überblick vorgestellt wird. Auch anwendungsübergreifende Maßnahmen wie die Auswahl der richtigen Viskosität, korrekte Wartung oder die Beseitigung von Leckagen haben – auch bedingt durch die große Anwendungsbreite – hohes Einsparpotential. Gründe für die mangelnde Umsetzung dieser Maßnahmen können in mangelndem Know-How oder geringer Priorisierung in den Firmen liegen, was auch die Studie (Brüggemann, 2005) nahelegt.

4.3 Zusammenfassung

Der Bezug der in Kapitel 3 vorgestellten Einsparpotentiale auf energetisch und wirtschaftlich relevante Branchen zeigt eine große Bandbreite verschiedenartiger Anwendungen, in denen die Fluidtechnik zur Übertragung von Kräften und Momenten eingesetzt wird. Aus diesem Grund ist eine allgemeingültige Definition von technisch sinnvollen Maßnahmen zur Einsparung von Energie nicht möglich. Die Betrachtung der Maßnahmengruppen „Steuerungs- und Regelungstechnik“, „Upgrade“ und „Substitution“ sowie deren Anwendung auf die Branchen Stationär- und Mobilhydraulik sowie die Drucklufttechnik lässt eine Clusterung der Maßnahmen auf bestimmte Maschinenkategorien zu, die in der Folge einzeln bewertet werden können. Hierfür wird die Methodik der QFD-Analyse angewendet, die durch eine Abwägung quantitativ schwer erfassbarer Kriterien untereinander die Bewertung unterschiedlicher Applikationen innerhalb eines Bewertungsschemas ermöglicht. Die Methode ermöglicht keine quantitative Abschätzung von Einsparpotentialen, was nur mit einer geeigneten und entsprechend umfangreichen Datenbasis möglich wäre. Im Ergebnis entsteht ein relativer Vergleich, der in allen Branchen technische Möglichkeiten zur Energieeinsparung mit großem Potential aufzeigt.

5 Maßnahmen zur Umsetzung

Die Auswahl der für eine Antriebsaufgabe einzusetzenden Technologie wird heute von Anwender*innen nach technischen sowie (betriebs-)wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen. Die Verringerung von Verlusten findet dabei auf technischer Ebene in Form der Reduzierung (störender) Abwärme sowie auf betriebswirtschaftlicher Ebene bei den anfallenden Energiekosten Berücksichtigung. Bei größeren Leistungen kann auch die Reduktion der Anschlussleistung eine Motivation sein; bspw. durch Installation von Kurzzeitspeichern oder Wahl einer Maschine mit geringerer Anschlussleistung, um die Abnahmeschwankungen nach Vorgabe der Netzbetreiber und damit den Strompreis zu reduzieren. Absehbar kommt der Aspekt der Netzsicherheit hinzu. Zunehmend werden dezentrale Energiespeicher am Markt angeboten. In diesem Kontext sind zudem alternative Energiepreismodelle zu nennen, die im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien in den nächsten Jahren umgesetzt werden könnten und vermutlich den Aufbau dezentraler Speicherlösungen begünstigen.

Betrachtungen zur ökologischen Nachhaltigkeit oder zur Reduzierung der CO₂-Emissionen werden untergeordnet betrachtet. Sie tauchen heute nicht in betriebswirtschaftlichen Rechnungen auf; es gibt keine allgemein anerkannten Maßstäbe zur Überführung dieser Kriterien in betriebswirtschaftliche Betrachtungen. Das Entstehen eines wirtschaftlichen Vorteils ist daher aktuell die überwiegende Triebkraft bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz.

5.1 Vergangene und aktuelle Förderrichtlinien

Um die Energieeinsparziele der Bundesregierung zu erreichen, wurden bereits verschiedene Maßnahmen durch die Regierung durchgeführt. Diese umfassen beispielsweise die Förderung der Einführung eines Energiemanagements nach ISO 50001, der Auditpflicht von großen Unternehmen nach dem „Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen“ (EDL-G), aber auch die direkte Förderung von Investitionen in energieeffiziente Anlagentechnik.

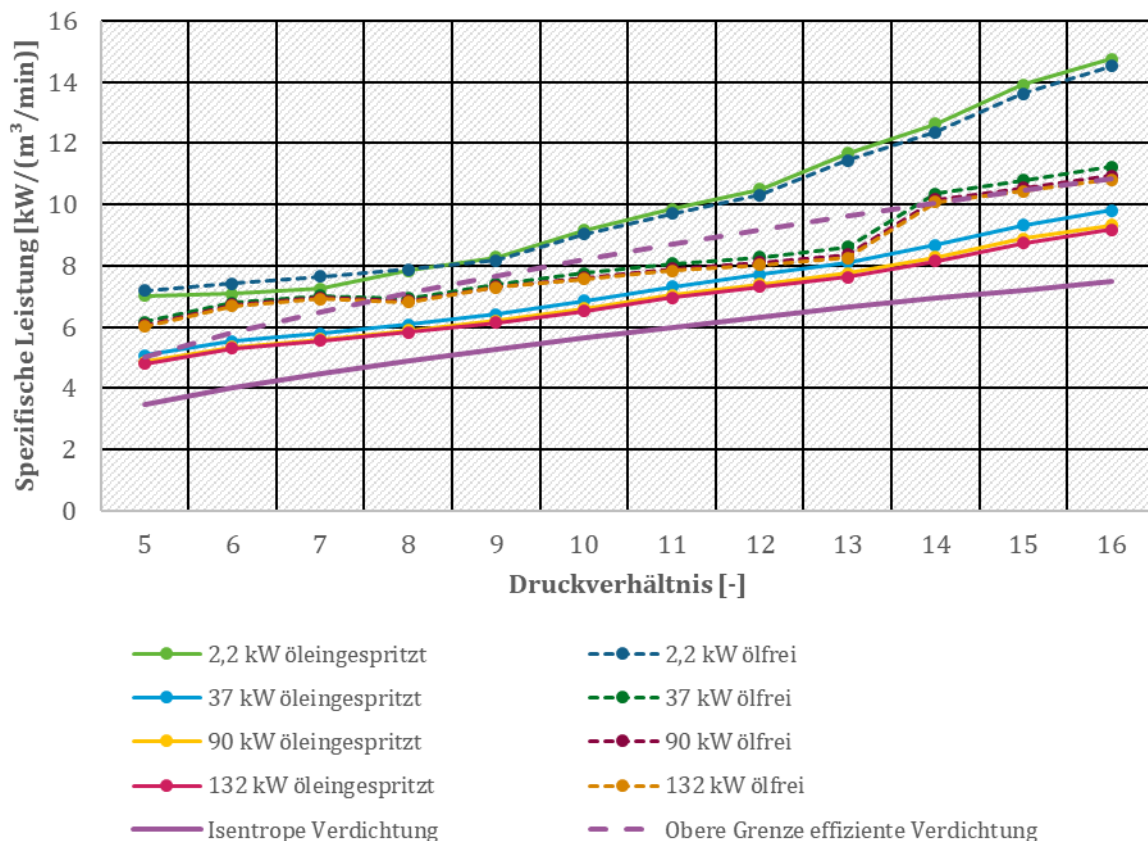
Im Jahr 2012 trat die „Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien im Mittelstand“ in Kraft. Im Rahmen der Richtlinie wurden Investitionen in effiziente Querschnittstechnologien gefördert. Die Druckluft war als Querschnittstechnologie in dieser Förderung abgedeckt. Das Förderprogramm war in Einzelmaßnahmen für den Austausch von einzelnen Komponenten und der systemischen Optimierung aufgegliedert.

Im Rahmen des Förderprogramms sind von 2012 bis 2015 36.264 Anträge eingegangen, die meisten (33.158) im Bereich der Einzelmaßnahmen. Es wurden insgesamt 25.194 Anträge bewilligt und 173 Mio. Euro an Fördermitteln ausgegeben; die angestoßene Investitionssumme beträgt 514 Mio. Euro, wovon 54 Mio. Euro im Druckluftbereich investiert wurden. Die Endenergieeinsparung durch die im Rahmen der Förderung umgesetzten Maßnahmen beträgt 989,6 GWh/a (*QST –Förderung 2012 -2015 Aktuelle Zahlen zur Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien im Mittelstand, 2017*).

Das Förderprogramm wurde von 2016 bis 2018 im Rahmen der „Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien“ ersetzt, blieb jedoch in großen Teilen erhalten. Antragsberechtigt sind die meisten Unternehmen mit Gewerbeanmeldung (N, 2020a). Die maximale Zuwendungshöhe betrug je nach Kategorie für „Einzelmaßnahmen“ 30.000 Euro, für „systemische Optimierung“ 100.000 Euro. Die Höhe des Zuschusses richtet sich nach der Unternehmensgröße, KMU erhielten 30% der förderfähigen

Kosten, größere Unternehmen 20% erstattet. Im Fall der Einzelmaßnahmen wurden im Druckluftbereich der Austausch von Kompressoren, der Einsatz von übergeordneten Steuerungen, die Installation von Wärmerückgewinnungssystemen sowie die Anschaffung von Ultraschallleckagesuchgeräten gefördert. Die Förderung des Kompressoraustauschs ist jedoch an die Erfüllung von Mindesteffizienzen der neuen Kompressoren gebunden. **Abbildung 38** zeigt die geforderten Mindesteffizienzen, um eine Förderung zu erhalten. Die Förderrichtlinie unterscheidet dabei in ölfreie und öleingespritzte Kompressoren, wobei strengere Grenzwerte für die öleingespritzten Kompressoren existieren. Die geforderte Mindesteffizienz steigt mit steigender Nennleistung der Anlage. In Abbildung 38 ist zusätzlich der Fall der adiabaten Verdichtung dargestellt, (violette Linie), was dem technischen Optimum entspricht (Baehr & Kabelac, 2012). Zusätzlich ist eine Grenzlinie zur effizienten Verdichtung angedeutet (violett gestrichelte Linie), diese stellt die 1,45-fache spezifische Leistung der isentropen Verdichtung dar und sollte von effizienten Druckluftkompressoren nicht überschritten werden (druckluft-effizient, 2003).

Abbildung 38: Mindesteffizienz von Kompressoren um eine BAfA-Förderung zu erhalten inkl. Darstellung des technischen Optimums (violett)



Quelle: (BAFA Referat 526, 2018), eigene Darstellung IER

Im Jahr 2020 wurde die Förderrichtlinie durch die „Richtlinie für die Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ abgelöst. Das Förderprogramm besteht nun aus vier Modulen, wobei Modul 1 die Querschnittstechnologien beinhaltet und eine Weiterführung der „Einzelmaßnahmen“ aus dem vorherigen Förderprogramm darstellt. Die Mindesteffizienzen sowie die förderfähigen Druckluftkomponenten sind identisch. Neu ist die Kombination des Förderprogramms mit der Möglichkeit eines zinsgünstigen Kredits seitens der KfW (Referat 513, 2020a).

Neu ist ebenfalls das Modul 4 des Förderprogramms. Dieses umfasst die energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen und ist technologieoffen. Folglich ist nun auch die Förderung von Effizienzmaßnahmen in der Hydraulik möglich. Anforderung ist eine Amortisationszeit die größer als zwei Jahre ist und zu einer CO₂-Einsparung führt. Im Maximalfall werden 500 Euro (große Unternehmen) bzw. 700 Euro (KMUs) je eingesparte Tonne CO₂ gefördert. Für die Antragserstellung muss ein Einsparkonzept erstellt werden (Referat 513, 2020b, p. 4).

Eine weitere Fördermöglichkeit besteht über das Umweltinnovationsprogramm des BMU. Im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms können Unternehmen sich großtechnische Anlagen mit Demonstrationscharakter fördern lassen. Für die Förderung stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Ein Investitionszuschuss von bis zu 30% oder ein Zinszuschuss zur Verbilligung eines Darlehens der KfW. Das Förderprogramm hat weder einen Mindest- noch einen Höchstbetrag. Ein Beispiel für ein Projekt im Bereich Mobilhydraulik ist der Erwerb und Einsatz eines 28 Tonnen Elektro-Baggers, welcher den Strom aus Lithium-Ionen Akkumulatoren bezieht. Ziel ist die Demonstration der Betriebstauglichkeit im großtechnischen Einsatz (*Umweltinnovationsprogramm*, n.d.).

5.2 Hemmnisse bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und ihre Beseitigung

5.2.1 Studien zu Hemmnissen bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen

Eine Befragung der KfW-Bankengruppe von 521 Firmen (95% davon KMU) zu Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen führt die Energiekosteneinsparung als Hauptmotivationsgrund für die Umsetzung betrieblicher Energieeffizienzmaßnahmen an (Brüggemann, 2005). Öffentliche Fördermittel wurden dabei von knapp 40% der Unternehmen in Anspruch genommen. Als wichtige bestehende Hemmnisse wurde Kapitalmangel (39%), eine zu hohe Arbeitsbelastung im Kerngeschäft (38%) sowie der fehlende Überblick über die Energiesparmöglichkeiten (23%) angeführt. Als wichtige Faktoren für die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen wurden die Energiekosteneinsparung (78%), eine für Umwelt- und Energiefragen sensibilisierte Geschäftsführung (50%), öffentliche Fördermaßnahmen (51%), eine erwartete Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen (36%) sowie motivierte und energiebewusste Mitarbeiter*innen genannt. Finanzielle Anreize werden von 72%, Steueranreize von 66%, und die Förderung unabhängiger Energieberatung von 45% der befragten Unternehmen als wirksames Instrument für die Erschließung von Effizienzpotentialen angesehen.

5.2.2 Hemmnisse bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen am Beispiel von Druckluftanwendungen

Die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen ist an verschiedene Kriterien gebunden, die über den jeweiligen Erfolg entscheiden. Die Identifikation von Hemmnissen erfolgt durch die Analyse von Literatur, sowie anhand von Gesprächen mit Anwender*innen beispielhaft für den Bereich der Drucklufttechnik, ist aber auch auf andere Bereiche übertragbar. Die identifizierten Hemmnisse werden dabei den folgenden Kategorien zugeordnet:

- ▶ Information,
- ▶ Motivation,

- ▶ Organisation,
- ▶ Investitionen und
- ▶ Verfügbarkeit.

Information:

Die Auswertung von Literatur und Fachgesprächen mit Anwender*innen ergibt, dass die Hemmnisse im Bereich Information am stärksten ausgeprägt sind. Zugriff auf herstellerneutrale Informationen ist schwer zu erlangen.

Lösung könnte der Aufbau herstellerneutraler Beratung mit unabhängigen Ansprechpartner*innen, zum Beispiel in einem Druckluft-Kompetenzzentrum sein. Ähnliche Instrumente für die Beratung durch unabhängige Energieeffizienzexpert*innen existieren in der Wohnungsbauförderung seit vielen Jahren.

Die Kampagne Druckluft effizient stellte auf Ihrer Website verallgemeinerte Informationen zur Verfügung. Die Webseite wurde im dritten Quartal 2020 durch die Professur für Effiziente Energienutzung der Universität Stuttgart übernommen und wird grundlegend überarbeitet und aktualisiert.

Anwender*innen beklagen, dass Hersteller teilweise keine vollständigen Datenblätter der Kompressoren bereitstellen. Dies erschwert den Auswahlprozess beim Kompressorkauf, eine Veröffentlichungspflicht würde Abhilfe schaffen. In den USA veröffentlichen die Hersteller Ihre technischen Daten in den sogenannten „CAGI Data Sheets“¹⁴. Energieberatungen zur Druckluft könnten in Form von Druckluftaudits nach ISO 11011 angeboten werden.

Motivation:

Durch die Trennung von Druckluftbereitstellung und -verwendung über ein zentrales Netz ist die umgesetzte Energiemenge nicht sichtbar. Die Visualisierung der Drucklufteffizienz in Unternehmen oder die verbrauchsbezogene Kostenabrechnung für Druckluft in Unternehmen könnte Anreize zum bewussten Umgang mit Druckluftenergie schaffen.

Organisation:

Zum Abbau der organisatorischen Hemmnisse scheint eine Förderung von Druckluftaudits nach ISO 11011 als Instrument vielversprechend. Dies garantiert einen vertieften Einblick, in das Druckluftsystem und deckt neue Potentiale auf. Zudem sollten Mindesteffizienzanforderungen in der ErP-Richtlinie vorgeschrieben werden. Es sollte zudem daran gearbeitet werden, dass die Zuständigkeiten für die Energieeffizienz im Druckluftsystem auch ohne ISO 50001 klar geregelt sind.

Investition:

Hemmnisse im Bereich Investition sind bei Druckluftsystemen nur von geringer Priorität, da Unternehmen bereits für viele Maßnahmen Investitionszuschüsse im Rahmen der

¹⁴ CAGI ist das Compressed Air and Gas Institute. Die Datenblätter wurden mit dem Hintergrund der besseren Vergleichbarkeit der Kompressoren für Kunden ins Leben gerufen.

Förderrichtlinie zu Querschnittstechnologien beantragen können. Der Komponentenaustausch wird in Modul 1, größere Änderungen die das Druckluftsystem betreffen in Modul 4 gefördert.

5.3 (Mega-)trends mit Einfluss auf die Energieeinsparpotentiale

Die Entwicklung der Antriebstechnik erfolgt neben der rein technischen Lösung einer Aufgabe auch in Abhängigkeit wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, die wiederum von lokalen und globalen Trends – hier Megatrends – beeinflusst werden. Megatrends können aus (geo-)strategischer Sicht den Einsatz von energieeffizienten Technologien verhindern oder beschleunigen. Sie können bei der Entwicklung geeigneter Maßnahmen auf politischer Steuerungsebene einbezogen werden.

Die Verknappung von Ressourcen beeinflussen die Rohstoffpreise maßgeblich. Im Bereich der Elektromotoren sind Selten-Erd-Magnete, die in Synchronmaschinen eingesetzt werden, betroffen. Asynchronmaschinen sind ohne diese Magneten aufgebaut, haben aber im Teillastbereich deutlich geringere Wirkungsgrade. Auch Halbleitermaterialien, die in Elektronik-Bauteilen wie Frequenzumrichtern eingesetzt werden, sind betroffen.

Größer werdende Konkurrenz durch eine bessere Vernetzung und stärkerer Welthandel sind ein wichtiger Faktor. Der Kostendruck wirkt sich auf die Haltbarkeit und den Einsatz hochwertiger Technologie aus. Solange der Kostenvorteil durch Energieeinsparungen nicht signifikant ist, wird der Einsatz energiesparender Technologien bedingt durch das Umstellungsrisiko nicht zeitnah erfolgen.

Die Klimakatastrophe stellt die Industrie vor große Herausforderungen, welche durch länderspezifischen Regulierungen umgesetzt werden. Diese Regulierungen bieten das Potential neben den Energiekosteneinsparungen Anreize zu schaffen, neue, energieeffiziente Technologien einzusetzen.

Die Digitalisierung eröffnet neue Möglichkeiten der Automatisierung, Vernetzung, Auswertung, die in Zukunft – wo immer ökonomisch sinnvoll – genutzt werden werden. Die Steigerung der Leistungsfähigkeit aller Technologien ist Inhalt des generellen technologischen Fortschritts und kann im Wettstreit der Technologien entscheidende Vorteile bringen.

Die Energiewende erfordert eine Flexibilisierung insbesondere der Elektroenergieaufnahme; in der Folge entsteht die Forderung nach Energiezwischen-speicherungen in Maschinen, die zunehmend bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Regulatorische Eingriffe können die Entwicklungsgeschwindigkeit hier erhöhen.

Digital Blending bezeichnet die zunehmende Verschmelzung von Beruf und Privatleben auf der Basis digitaler Kommunikation. So nehmen Arbeitnehmer*innen auch außerhalb bisher geregelter Arbeitszeiten Eingriffe in Systeme vor und verkürzen die Reaktionszeiten auf Fehler in Prozessabläufen signifikant.

Die Upgradefähigkeit von Systemen ist ein Entwicklungsfaktor, der die Software-Nachrüstung bereits installierter Maschinen mit geringem Aufwand ermöglicht. Steuerungs- und regelungstechnische Maßnahmen können so direkt angewendet werden; Modernisierungszyklen werden signifikant verkürzt.

Die Entwicklung digitaler Prozessabbilder ermöglicht die Verhaltens- und Kostenvorhersage von Komponenten, Maschinen oder vernetzten (dezentralen) industriellen Fertigungsprozessen. Eine Voraussage der Amortisierung im Sinne einer TCO-Abschätzung kann Hemmnisse beim Einsatz einer neuen Technologie abbauen und Modernisierungen beschleunigen. Die Integration von Sensorik und die automatisierte Speicherung und Auswertung der Daten ermöglicht die

zielgerichtete Analyse von Energiebedarfen und ihre zeitliche Vorhersage. So kann Einfluss auf Produktionsprozesse genommen und der Energiebedarf den Erfordernissen angepasst werden.

Die Qualifikation von Entwickler*innen und Anwender*innen ist wichtiger Schlüssel zum energieeffizienten Einsatz einer Technologie. Dieser Hürde kann auf der Ebene der Ausbildung politisch entgegengesteuert werden.

5.4 Zusammenfassung

Den vorgeschlagenen technisch sinnvollen Energieeinsparpotentialen stehen Hemmnisse gegenüber, die eine Umsetzung in der Praxis verhindern. Sie lassen sich in personalpolitische und wirtschaftliche Hemmnisse unterteilen. Die Kenntnis und das fachliche Verständnis einer Maßnahme ist Bedingung für eine Einschätzung des vorliegenden anwendungsbezogenen Einsparpotentials. Weitere Faktoren wie die Priorität von Einsparmaßnahmen, die Motivation der Mitarbeiter oder Entscheidungsstrukturen in Unternehmen sind Faktoren, die unabhängig von der technischen Machbarkeit erheblichen Einfluss auf die Umsetzung von Einsparmaßnahmen haben.

Ein wesentliches wirtschaftliches Hemmnis ist oftmals die mangelnde Rentabilität von Maßnahmen in den vorgegebenen Amortisationszeiten. Der wirtschaftliche Effekt der Einsparungen ist aufgrund verhältnismäßig geringer Energiekosten heute oftmals nicht ausreichend, um die Kosten für die Umstellung zu refinanzieren. In der Folge werden Maßnahmen als „Begleitmaßnahmen“ im Rahmen anderen Modernisierungen umgesetzt und kommen damit deutlich später in einer Vielzahl von Anwendungen an.

6 Quellenverzeichnis

- Achten, P. A. J. (2015). General Rules for the Design of Efficient Hydrostatic Machines. 14.
- Achten, P. A. J., Schellekens, M. P., Murrenhoff, H., & Deeken, M. (2004). Efficiency and low speed behavior of the floating cup pump. SAE Transactions, Vol 113, 366–376.
- AGEB. (2018). *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017* (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, p. 38) [Studie]. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- Agricola, A., Radgen, P., & Zelinger, M. (2005). *Abschlussbericht zur Kampagne „Druckluft-effizient“* [Abschlussbericht]. DENA, Fraunhofer ISI, VDMA.
- Alibert, M., & Schimmel, T. (2012). The Importance of Viscosity for Hydraulic Fluid Efficiency – What Can We Learn from a Decade of Fluid Development? *Proceedings of the 8th International Fluid Power Conference*. 8th International Fluid Power Conference (IFK), Dresden.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2019). *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland—Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken* (p. 40). https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_anwendungsbilanz2018_v3.pdf
- Aumer, W. (2018). *Funktionsintegration elektrischer Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57457-7>
- Baehr, H. D., & Kabelac, S. (2012). *Thermodynamik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24161-1>
- BAFA Referat 526. (2018). *Einzelmaßnahmen Merkblatt für Anträge nach 3.1.1 der Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien vom 29. April 2016*. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/qst_merkblatt_einzelmassnahmen_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- Bauer, U., & Winz, G. (2015). *Ermittlung des Baumaschinenbestandes in Deutschland* [Studie]. FZA Forschungszentrum Allgäu.
- Berchten, S., & Ritz, C. (2006). *Ersatz von Pneumatischen und hydraulischen Antrieben durch Elektroantriebe—Potentialanalyse* (Potentialanalyse No. 101380/151641; p. 41). Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität.
- BMEL. (2017). *Daten und Fakten—Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau* (p. 44) [Broschüre]. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). www.bmel.de/publikationen
- BMU. (2016). *Klimaschutzplan 2050—Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung* (p. 92).
- BMU, A. I. I. 1, Welke, M., & Beck, M. (2020). *Klimaschutz in Zahlen—Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2020*. BMU.
- Bock, W., Dornacher, G., & Schürmann, T. (2018). Hydraulic Fluids – Solutions of Complex Requirements. *11th International Fluid Power Conference, 11. IFK*, pages 404-411. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2018-224803>
- Bögel, T., & Lindner, M. (2019, 15.3). *Why we don't use Batteries—The Promise of Diesel-Electric Drives* [Presentation]. 2nd Annual Battery Development & Alternative Electrification for Non-Road Applications, Berlin.
- Boyko, V. (2020). Combinations of Energy Saving Measures in Pneumatics. *Proceedings of the 12th International Fluid Power Conference*, 43–51.
- Brüggemann, A. (2005). *KFW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen* (Publikation der Volkswirtschaftlichen Abteilung, p. 47). KFW Bankengruppe. www.kfw.de

- Brun, M., Deutz AG, Maringer, T., Schwabauer, P., Knaps, G., Hoffmann, P., & Joisten, J. (2015). *Schlussbericht des Projektes GReen Industrial Diesel (GRID): Berichtszeitraum: 01.12.2011 bis 30.11.2014*. DEUTZ AG. <https://doi.org/10.2314/GBV:856899070>
- Caldwell, N. (2018, September 12). Review of Early Work on Digital Displacement® Hydrostatic Transmission Systems. *BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control*. BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Bath, UK. <https://doi.org/10.1115/FPMC2018-8922>
- Caldwell, N. (2019). *Digital Displacement Technology or 'It's electric so it's green by definition!'* [Präsentation]. CCEFP Summit, Purdue.
- Datenblatt AA1121—Linearaktuator*. (n.d.).
- Demtröder, W. (2008). *Mechanik und Wärme* (5., neu bearb. und aktualisierte Aufl). Springer.
- DIN 51563:2011-04, Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen_ - Bestimmung des Viskosität-Temperatur-Verhaltens_ - Richtungskonstante m*. (n.d.). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1748810>
- DIN EN 60034-30-1 Drehende elektrische Maschinen—Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code)*. (2014).
- Dindorf, R. (2012). Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems. *Procedia Engineering*, 39, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.026>
- Dr. Boy GmbH. (2019, August). Effizienzsteigerung durch EconFluid bei BOY [Firmenwebsite]. *Pressemitteilung*. <https://www.dr-boy.de/aktuelles/pressemitteilungen/pm-242019/>
- Drescher, U. (2018). Torquemotoren – Stärken, Einsatzgebiete und typische Optimierungskriterien. *Konstruktionspraxis, online*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/torquemotoren-staerken-einsatzgebiete-und-typische-optimierungskriterien-a-511825/>
- druckluft-effizient. (2003). *Infoblatt Thermodynamik*. www.druckluft.ch
- Dunkermotoren AG. (2019). *CASM-32 Pro*. Produkte - Dunkermotoren.
- Dustman, C. K. (2006, November 24). *Performance Benefits of High Viscosity Index Hydraulic Fluids*. Lubricants, Moscow, Russia.
- Eichhammer, W., & Fleiter, T. (2012). *Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options for developing countries*. https://www.researchgate.net/publication/265395773_Energy_efficiency_in_electric_motor_systems_Technology_saving_potentials_and_policy_options_for_developing_countries
- Elektrische Antriebe für Energiemanagementsysteme. (n.d.). *Antriebstechnik*, 07/2019, 22–24.
- EnEffAH - Projektkonsortium. (2012a). *EnEffAH - Grundlagen und Maßnahmen*.
- EnEffAH - Projektkonsortium. (2012b). *EnEffAH - Grundlagen und Maßnahmen*.
- EnEffAH Projektkonsortium. (2012). *Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik* (Abschlussbericht FKZ 0327484A-E; Issue FKZ 0327484A-E).
- Eriksson, B., Linköpings universitet, & Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling. (2007). *Control strategy for energy efficient fluid power actuators: Utilizing individual metering*. Department of Management and Engineering, Linköping University.
- EtaOpt. (2020). *Produktportfolio und Referenzprojekte* [Produktflyer]. https://etaopt.de/wp-content/uploads/2018/10/etaopt_Produktportfolio_DE.pdf
- ETSU, & AEAT PLC. (2001). *Study on Improving the Energy Efficiency of Pumps* (p. 70) [Abschlussbericht]. European Commission.

- Verordnung (EU) 2019/1781 der Kommission vom 1. Oktober 2019, Pub. L. No. EU 2019/1781, 21 (2019).
- Fecke, M. (2018). *Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test*. Bergische Universität Wuppertal.
- Finzel, R. (2011). *Elektrohydraulische Steuerungssysteme für mobile Arbeitsmaschinen*. Shaker.
- Ge, L., Quan, L., Zhang, X., Zhao, B., & Yang, J. (2017). Efficiency improvement and evaluation of electric hydraulic excavator with speed and displacement variable pump. *Energy Conversion and Management*, 150, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.010>
- Gebhardt, N., & Weber, J. (Eds.). (2020a). *Hydraulik – Fluid-Mechatronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Messtechnik und virtuelles Engineering*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60664-3>
- Gebhardt, N., & Weber, J. (Eds.). (2020b). *Hydraulik – Fluid-Mechatronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Messtechnik und virtuelles Engineering*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60664-3>
- Geissler, M. (2006). *Beitrag zur Integration eines elektrischen Einzelradantriebes in eine Landmaschine* [Dissertation]. TU Dresden.
- GENESIS-ONLINE. (2020). *51000-0013: Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warenverzeichnis (8-Steller)*. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>
- Green, M., Macpherson, J., Caldwell, N., & Rampen, W. H. S. (2018, September 12). DEXTER: The Application of a Digital Displacement® Pump to a 16 Tonne Excavator. *BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control*. BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Bath, UK. <https://doi.org/10.1115/FPMC2018-8894>
- Helbig, A. (2007). *Energieeffizientes elektrisch-hydrostatisches Antriebssystem am Beispiel der Kunststoff-Spritzgießmaschine*. Shaker.
- Helms, H., & Heidt, C. (2014). *Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand* (UBA-FB 001913; Issue UBA-FB 001913, p. 99).
- Helmus, M., & Fecke, M. (2015). *Standardisierung definierter Lastzyklen und Messmethoden für die Energieverbrauchsermittlung von Baumaschinen* (Abschlussbericht No. 01FS12051). Bergische Universität Wuppertal, Interdisziplinäres Zentrum III. <https://doi.org/10.2314/GBV:86993631X>
- Hepke, J. (2017). *Energetische Untersuchung und Verbesserung der Antriebstechnik pneumatischer Handhabungssysteme*. TU Dresden.
- Herlitzius, T., Aumer, W., Kunze, G., & Büchholz, P. (2012). Status Elektromobilität für mobile Arbeitsmaschinen. *Baumaschine.de - Wissensportal Bau- Und Baustoffmaschinen*, 11(1).
- Herzog, S., & Gregg, D. (2008). *Improving Fuel Economy and Productivity of Mobile Equipment through Hydraulic Fluid Selection: A Case Study*. 61–66.
- Herzog, S. N., Zink, M., & Michael, P. W. (2009). Hydraulic Fluid Viscosity Selection for Improved Fuel Economy. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2(2), 61–65. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2845>
- Heybroek, K. (2017). *On Energy Efficient Mobile Hydraulic Systems: With Focus on Linear Actuation* [PhD Thesis]. Linköping University Electronic Press.
- Hülsmann, S., Boyko, V., Raisch, A., Ohrem, J., Weichelt, R., Weber, J., & Sawodny, O. (n.d.). Energieeffiziente antriebstechnik in der Produktion. *O + P Ölhydraulik Und Pneumatik*, 10/2019(10/2019), 46–51.

- Hülsmann, S., Boyko, V., Raisch, A., Ohrem, J., Weichelt, R., Weber, J., & Sawodny, O. (2019). Energieeffiziente Antriebstechnik in der Produktion. *O + P Ölhydraulik Und Pneumatik*, 10/2019(10/2019), 46–51.
- Hülsmann, S., Volk, R., Boyko, V., Raisch, A., Weber, J., & Sawodny, O. (2020). Energieeffiziente Antriebstechnik in der Produktion—Herausforderungen bei der Umsetzung. *O+P Fluidtechnik*, 2020/09, 38–41.
- Inderelst, M. (2013). *Efficiency improvements in mobile hydraulic systems*. Shaker.
- Inderelst, M. (2014). Rating of Efficiency Improvements in Mobile Hydraulic Systems. *Proceedings of the 9th International Fluid Power Conference*, 3, 391–401.
- Innas BV. (2020). *performance of Hydrostatic Machines—Extensive Measurement Report*. https://www.innas.com/assets/performance-of-hydrostatic-machines_jun2020.pdf
- Karvonen, M. (2016). *Energy Efficient Digital Hydraulic Power Management of a Multi Actuator System*. Tampere.
- Kohno, Y., & Somukawa, M. (2014). *Die Cushion Drive For Press Machine* (Patent No. EP1882534B1, WO2006/123452).
- König, M. (2020). Einsatz von VG22-Hydraulikölen in Spritzgießmaschinen. *Kunststoffe*, 2/2020, 52–56.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2016). *Fahrzeugzulassungen (FZ)—Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) FZ25* (p. 103) [Statistik]. Kraftfahrt-Bundesamt. www.kba.de
- Krstić, M. (2010). An Integrated Fluid Concept—Delivering a Machine that Requires no Oil Change. *Proceedings of the 7th International Fluid Power Conference, Workshop*, 1–14.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2020). *KTBL - Dieselbedarfsrechner*.
- Leutenegger, P., Amann, M., Bertsch, A., Braun, S., Dropmann, M., Grotz, M., Henkel, H., Kipp, M., Kirchner, R., Koch, A., Kolbe, P., Lavergne, H.-P., Philipp, E., Scheidt, M., Stucke, M., Zimmer, M., & GmbH, L.-E. (2018). *LiView®: A disruptive sensor technology for intelligent hydraulic components*. 7.
- Lohse, H., Weber, J., Neumann, S., Händle, W., & Klug, D. (2015a). Investigation and improvement of the Energy Efficiency of Hydraulic Deep Drawing Presses. *Proceedings of The Fourteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, 12.
- Lohse, H., Weber, J., Neumann, S., Händle, W., & Klug, D. (2015b). Investigation and improvement of the Energy Efficiency of Hydraulic Deep Drawing Presses. *Proceedings of The Fourteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, 12.
- Love, L. J. (2012). *Estimating the Impact (Energy, Emissions and Economics) of the US Fluid Power Industry* (ORNL/TM-2011/14, 1061537). <https://doi.org/10.2172/1061537>
- Love, L. J., Lanke, E., & Alles, P. (2012). *Estimating the impact (energy, emissions and economics) of the US fluid power industry* (ORNL/TM-2011/14, 1061537; Issue ORNL/TM-2011/14, 1061537, p. 45). Oak Ridge National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1061537>
- Lübbert, J., Sitte, A., Beck, B., & Weber, J. (2016). Load-Force-Adaptive Outlet Throttling: An Easily Commissionable Independent Metering Control Strategy. *BATH/ASME 2016 Symposium on Fluid Power and Motion Control*, V001T01A050–V001T01A050. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2580077>
- Lübbert, J., Sitte, A., & Weber, J. (2016). *Pressure compensator control—a novel independent metering architecture*. 10th International Fluid Power Conference, Dresden. https://www.researchgate.net/profile/Jan_Luebbert/publication/310144469_Pressure_compensator_control_-_a_novel_independent_metering_architecture/links/5829ac7008ae825cda7ef832/Pressure-compensator-control-a-novel-independent-metering-architecture.pdf

- McKane, A., & Hasanbeigi, A. (2010). *Motor Systems Efficiency Supply Curves*. United Nations Industrial Development Organization. https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/unido_-_un-energy_-_2010_-_motor_systems_efficiency_supply_curves_2.pdf
- Merkelbach, S. (2020). *Analysis of the Economic and Ecological Properties of Pneumatic Actor Systems with Pneumatic Transformers*. RWTH Aachen.
- Merkelbach, S., & Eßer, B. (2015). *Wirtschaftlichkeitsanalyse pneumatischer und elektromechanischer Antriebstechnik* (Abschlussbericht FKM-Nr. 702980; p. 65). RWTH Aachen University.
- Michael Koch GmbH. (2016). *Bremsenergie managen: Handling-Roboter“*. http://www.bremsenergie.de/sites/default/files/2020-06/20160412_Koch_DES_Roboter_Mailversion-dt.pdf
- Michel, S. (2012). *Energieeffiziente elektrohydraulische Antriebe kleiner Leistung* (Abschlussbericht FKM 202420; p. 103). TU Dresden, Institut für Fluidtechnik.
- Michel, S., & Weber, J. (2012). Energy-efficient electrohydraulic compact drives for low power applications. In D. N. Johnston (Ed.), *Fluid Power and Motion Control (FPMC 2012)* (pp. 93–107). Centre for Power Transmission and Motion Control.
D:\01_Projekte\2012_Thermik_Lebensdauer_Kompaktachse\02_Literatur_Thermik_Lebensdauer\99_Citavi\Thermik_Verschleiß_Kompaktachsen_Citavi5\Citavi Attachments\imac2 - FPMC Section 1.indd.pdf
- N, N. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 Mit Erläuterungen*. DESTATIS. destatis.de
- N, N. (2018a). *Entwicklung der Inlandsablieferung von Schmierstoffen (1995 – 2018)*. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/Mineraloel/moel_entw_inlandsablieferung_schmierst_1995_2018.html
- N, N. (2018b). *Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification*. ISO.
- N, N. (2019). *Volvo CE unveils electric compact excavator and wheel loader at bauma*.
- N, N. (2020a). Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft—Zuschuss. *Bundesamt Für Wirtschaft Und Ausfuhrkontrolle*. https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Novellierung_2020/novellierung_2020_node.html
- N, N. (2020b). *DIN EN 16603-11:2020-02 Raumfahrttechnik: Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien*. Beuth.
- N, N. (2020c). *Grundlagen der Vakuumtechnik*. Festo Eigenverlag. https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/9916/Grundlagen_Vakuumtechnik.pdf
- N, N. (2020d, July 21). *Belaz—Vehicle for high Achievements* [Firmenwebsite]. belaz.by/en/
- NANOS Instruments GmbH. (2015). *Linear Piezo Stage LPS-30 system- Datenblatt*.
- Neveu, C., D., Alibert, M., J., & Camera, F. (2008). Achieving Efficiency Gains through Hydraulic fluid Selection: Laboratory Prediction and Field Evaluation. *Goriva i Maziva*, 47.3, 248.
- NTI AG. (2020). *Kostenoptimierung bei linearen Bewegungen—Ersatz von Pneumatik durch industrielle Linearmotoren*. Firmenschrift NTI AG. www.linmot.com
- Placek, D. G., Herzog, S. N., & Neveu, C., D. (2003). *Reducing energy consumption with multigrade hydraulic fluids*. 9th annual Fuels & Lubes Asia Conference and Exhibition, Singapore.
- PRODCOM. (2018). *Statistics on the production of manufactured goods Value ANNUAL 2018, Luxemburg*. https://ec.europa.eu/eurostat/documents/120432/10398214/Website_snapshot_2018_N2+%281%29.xlsx/3170ebc2-2ec4-b45b-3381-cd37449f308b

Putz, M., & Blau, M. (2016). *Energy Storage in Drive Systems of servo presses for reduction of peak power and energy recovery*. Fraunhofer Insitutte for machine tools and forming technology.

QST –Förderung 2012 -2015 Aktuelle Zahlen zur Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien im Mittelstand (p. 4). (2017). Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/qst_foerderung_2012_bis_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Rademacher, R. (2018, February). *Folienbasierter Miniaturaktor: 'Krokodil' mit Formgedächtnis* [Industrieanzeiger.industrie.de]. 'Krokodil' Mit Formgedächtnis.

<https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/krokodil-mit-formgedaechtnis/>

Radgen, P., & Blaustein, E. (Eds.). (2001). *Compressed air systems in the European Union: Energy, emissions, savings potential and policy actions*. LOG_X.

Rahmfeld, R., & Weber, J. (2004). Displacement Controlled Wheel Loader – a simple and clever Solution. *Proceedings of the 4th International Fluid Power Conference, 2*, 183 ff.

Referat 513, B. (2020a). *Modul 1—Querschnittstechnologien Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss*.

https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_modul1_qst_merkblatt_tma_neu.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Referat 513, B. (2020b). *Modul 4 – Energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss*.

https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_modul_4_oap_merkblatt_tma_neu.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Reinertz, O., & Schmitz, K. (2019). *Hydro-Mechanical Displacement Cotnrol Concepts for Digital Displacement Pumps*. The 10th Workshop on Digital Fluid Power, Linz, Austria.

Reinhardt, G. A. (1993). *Energie- und CO2-Bilanzierung Nachwachsender Rohstoffe*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-84192-6>

Ristic, M., & Wahler, M. (2018). Electrification of Hydraulics Opens New Ways for Intelligent Energy-Optimized Systems. *Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference, 2*, 218–231.

Rohde, C. (2019). *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industire und GHD* (p. 34).

Romare, M., & Dahlöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries* (C 243; p. 58). IVL Swedish Environmental Research Institute.

Rydberg, K.-E. (2013, June). Hydraulic Fluid Porperties and their Impact on Energy Efficiency. *Proceedings of The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power SICFP2013, Liniköping, Sweden.

Scherer, Markus, Herzog, S. N., Neveu, C., D., & Placek, D. (2004). Reduce Energy Consumption and Increase Performance by Selecting the Optimum Viscosity Grade of Hydraulic Fluid. *Proceedings of the 4th International Fluid Power Conference, 2*, 343–356.

Scherer, Martin. (2015). *Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom*. KIT Scientific Publishing.

Schmalz, Fa. (2020, May 13). *Vakuum-Erzeuger*. Vakuum Erzeuger.

<https://www.schmalz.com/de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/vakuum-erzeuger>

Schmid, C., Brakhage, A., Radgen, P., Layer, G., Arndt, U., Carter, J., Duschl, A., Lilleike, J., & Nebelung, O. (2003). *Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs*

branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch (Abschlussbericht FKZ 20141136; p. 296).

Schneider, M., Koch, O., & Weber, J. (2016). Green Wheel Loader – improving fuel economy through energy efficient drive and control concepts. *10th International Fluid Power Conference (10. IFK.March 8-10, 2016 in Dresden, 2*, 63–78. <https://katalogbeta.slub-dresden.de/id/0017300536/#detail>

Schröter, J., Jacobs, G., Zhitkova, S., Feldern, M., & Hameyer, K. (2014). Development of High Speed Electrical Drives for Mobile Machinery – Challenges and Potential Solutions. *Proceedings of the 9th International Fluid Power Conference, 3*, 416–427.

Shabi, L. (2020). *Thermo-energetisch optimierte Fluid-Systeme für Werkzeugmaschinen* [Dissertation, Technische Universität Dresden]. <http://d-nb.info/1203959982>

Smith, S. (2012). Gesicherte Lebensdauer von Hydraulikschläuchen ausnutzen. *MM - Maschinenmarkt, 31/32*, 46–48.

statistisches Bundesamt. (n.d.). *GENESIS Onlinedatenbank*. Retrieved 28 August 2020, from <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1598604962987&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=42131-0003&auswahltext=&wertauswahl=549&wertauswahl=579&wertauswahl=619&wertauswahl=620&wertauswahl=623&wertauswahl=550&wertauswahl=578&nummer=15&variable=15&name=GP09A9&wertabruf=Werteabruf#abreadcrumb>

Steinert, F. (2013). *Entwicklung einer Methode zur Optimierung von Betriebsstrategien für Nebenaggregate konventionell angetriebener Stadtbusse*. TU Dresden.

Tanaka, Y., Sakama, S., Nakano, K., & Kosodo, H. (2013). Comparative Study on Dynamic Characteristics of Hydraulic, pneumatic and electric Motors. *Proceedings of the ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control*. ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control - FPMC 2013, Sarasota, Florida, USA.

Tuohey, M. (2016). *Entwicklung eines zuverlässigen und effizienten Vakuumsystems*. Piab USA Inc. <https://www.piab.com/de-DE/white-papers/allgemein/entwicklung-eines-zuverlassigen-und-effizienten-vakuumsystems/>

Umweltbundesamt. (2020a). *Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2018 (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent)*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2019_01_15_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v0.6.1_f-gase.xlsx

Umweltbundesamt. (2020b, July 12). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2018. *Umweltbundesamt - Pressemitteilungen*. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-1>

Umweltinnovationsprogramm. (n.d.). Retrieved 24 September 2020, from www.umweltinnovationsprogramm.de

VDMA, & VDMA Verlag GmbH. (2018). *Statistisches Handbuch für den Maschinenbau 2018*.

Vukovic, M. (2017). *Hydraulic Hybrid Systems for Excavators* [Dissertation]. RWTH Aachen University.

Weber, J., & Michel, S. (2012). *Energieeffiziente, elektrohydraulische Antriebe kleiner Leistung* [Abschlussbericht, Technische Universität Dresden]. E:\Uni\01_Projekte\2009_Kleine Leistungen\07_Abschlussbericht\Abschlussbericht_Antriebe_kleiner_Leistung.pdf

Willkomm, J. (2016). *Modellprädiktive Optimierung drehzahlvariabler Verstellpumpen* [Dissertation, TU Dresden]. <https://katalogbeta.slub-dresden.de/id/0-865436436/#detail>

- Willkomm, J., Wahler, M., & Weber, J. (2014). Model Predictive Control of Speed-Variable Variable-Displacement Pumps to Optimize Energy Efficiency. *Proceedings of the 9th International Fluid Power Conference, 1*, 372–385.
- Wissenschaftlicher Dienst des deutschen Bundestages, N. N. (2007). *CO2-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich* (WD 8-056/2007; p. 33). Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages.
- Wittenstein AG. (2019). *Galaxie—Überlegen aus Prinzip*. Firmenschrift Wittenstein AG.
- XENERGY inc. (2002). *United States Industrial Electric motor Systems Market Opportunities Assessment* (p. 386) [Final Report]. www.oit.doe.gov/bestpractices/
- Yanmar Co., Ltd. (2019, April 10). Yanmar Unveils its Exciting New eFuzion Concept at bauma [Firmenwebsite]. *Yanmar*.
<https://www.yanmar.com/global/construction/news/2019/04/10/53748.html>
- Yoon, J. I., Truong, D. Q., & Ahn, K. K. (2013). A generation step for an electric excavator with a control strategy and verifications of energy consumption. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14*(5), 755–766. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0099-6>
- Zhang, S., Minav, T., & Pietola, M. (2017). Improving Efficiency of Micro Excavator wit Decentralized Hydraulics. *Proceedings of the ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control*. ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Sarasota, Florida, USA.
- Zhang, Y., & Cai, M. (2014). Overall life cycle comprehensive assessment of pneumatic and electric actuator. *Chinese Journal of Mechanical Engineering, 27*(3), 584–594.
<https://doi.org/10.3901/CJME.2014.03.584>
- Zimmerman, J., Busquets, E., & Ivantysynova, M. (n.d.). *40% Fuel Savings by Displacement Control Leads to Lower Working Temperatures – A Simulation Study and Measurements*. 10.

A Anhang

A.1 Methodik zur Ermittlung äquivalenter Kräfte und Leistungen zum Vergleich von Linearantrieben

Um eine Vergleichbarkeit der linearen Antriebssysteme zu schaffen, werden Kraft- und Leistungsdichte als Kriterien herangezogen und verglichen. Da die Masse für stationäre Anwendungen eher weniger von Belang ist und zudem vom Hub des Linearantriebs abhängt, werden Kraft und Leistung zunächst auf die Querschnittsfläche eines äquivalenten Hydraulik- bzw. Pneumatikzylinders bezogen. So lassen sich die Antriebsprinzipien mit Bezug zum Einbauquerschnitt gegenüberstellen, wobei die Aktorlänge und damit der tatsächliche Bauraumbedarf stark voneinander abweichen können. Zur Berechnung der Querschnittsfläche wird, ungeachtet ob kreisförmige oder quadratische Grundfläche des Antriebszylinders, der in den jeweiligen Antriebszylinder größtmöglich einschreibbare Kreis herangezogen. Als Referenz werden exemplarisch Pneumatik- und Hydraulikzylinder aus dem Sortiment großer deutscher Hersteller in die Diagramme aufgenommen. Zudem werden Hydraulik und Pneumatik als Grenzgeraden, mit den Parametern $p = 310 \text{ bar}$ und $v = 1 \text{ m/s}$ bzw. $p = 6 \text{ bar}$ und $v = 1 \text{ m/s}$, in den Diagrammen berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass die auf den Außendurchmesser bezogene Zylinderquerschnittsfläche zu 80% für die Krafterzeugung ausgenutzt wird (geringerer Querschnitt durch Zylinderwandung). So ergeben sich spezifische Kraftwerte von $p_{\text{äq}} = 0,8 \cdot 310 \text{ bar} = 2480 \text{ N/cm}^2$ für die Hydraulik bzw. $p_{\text{äq}} = 0,8 \cdot 6 \text{ bar} = 48 \text{ N/cm}^2$ für die Pneumatik. Bei der angenommenen Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/s ergeben sich daraus spezifische Leistungswerte von 2480 W/cm^2 für die Hydraulik bzw. 48 W/cm^2 für die Pneumatik. Abweichende Arbeitsdrücke bzw. Vorschubgeschwindigkeiten entsprechen einer Anpassung des Anstiegs der soeben hergeleiteten Grenzgeraden für Hydraulik und Pneumatik.

Da bei elektromechanischen Zylindern die Lebensdauer lastabhängig ist, werden zwei Lastfälle als extremale Abschätzungen betrachtet. Ein Lastfall mit sehr hoher Ausnutzung des Antriebs: als Aktorkraft wird dazu die Hälfte der dynamischen Tragzahl C_{dyn} oder, falls geringer, die maximale vom Hersteller angegebene Aktorkraft, angesetzt. Einige Elektrozyylinder werden mit dieser Angabe bzgl. ihrer Kraft- und Leistungsdichte unterschätzt. Die halbe dynamische Tragzahl wird vielfach als Obergrenze für die Gültigkeit der Lebensdauerprognose angegeben. Der zweite Lastfall ist auf eine vergleichsweise hohe, fiktive Laufleistung von 30.000 km hin ausgelegt und soll als quasi dauerfeste Auslegung angesehen werden. Spezifische Kräfte ($F_{30000\text{km}}$) und Leistungen der Elektrozyylinder sind entsprechend geringer. Dies geht auch aus der folgend aufgeführten Lebensdauerformel hervor, die alle Hersteller von wälzkontaktbehafteten Maschinenelementen in mehr oder weniger umfangreicher Form für die Lebensdauerprognose implementieren:

$$L_N = \left(\frac{C_{\text{dyn}}}{F_{\text{Lastkollektiv}}} \right)^3 \cdot L_{\text{Bezug}} \quad (1)$$

Darin ist L_N die Lebensdauer in Umdrehungen, C_{dyn} die dynamische Tragzahl und $F_{\text{Lastkollektiv}}$ die effektiv für das Lastkollektiv wirksame Kraft. Bei einer Belastung mit $F_{\text{Lastkollektiv}} = C_{\text{dyn}}$ ergibt sich der Klammerausdruck zu 1 und der Antrieb erreicht mit einer bestimmten Erlebenswahrscheinlichkeit (typischerweise 90%) die angegebene Bezugslebensdauer L_{Bezug} . Bei Gewindespindelantrieben wird, wie bei Wälzlagern, typischerweise 1 Million Umdrehungen als Bezug gewählt. Mit der Spindelsteigung ergibt sich daraus ein Fahrweg – bspw. von 10 km bei 10 mm Spindelsteigung. Bei der typischerweise als Grenzwert angegebenen Belastung von bzw. in der Größenordnung von $\frac{1}{2} C_{\text{dyn}}$ ergibt sich bereits die achtfache Lebensdauer. Die Formel kann um Faktoren erweitert werden, bspw. um höhere Erlebenswahrscheinlichkeiten oder Last- bzw. Stoßfaktoren zu berücksichtigen.

Üblicherweise wird das Vorgehen zur Lebensdauerberechnung in den Herstellerdokumentationen angegeben.

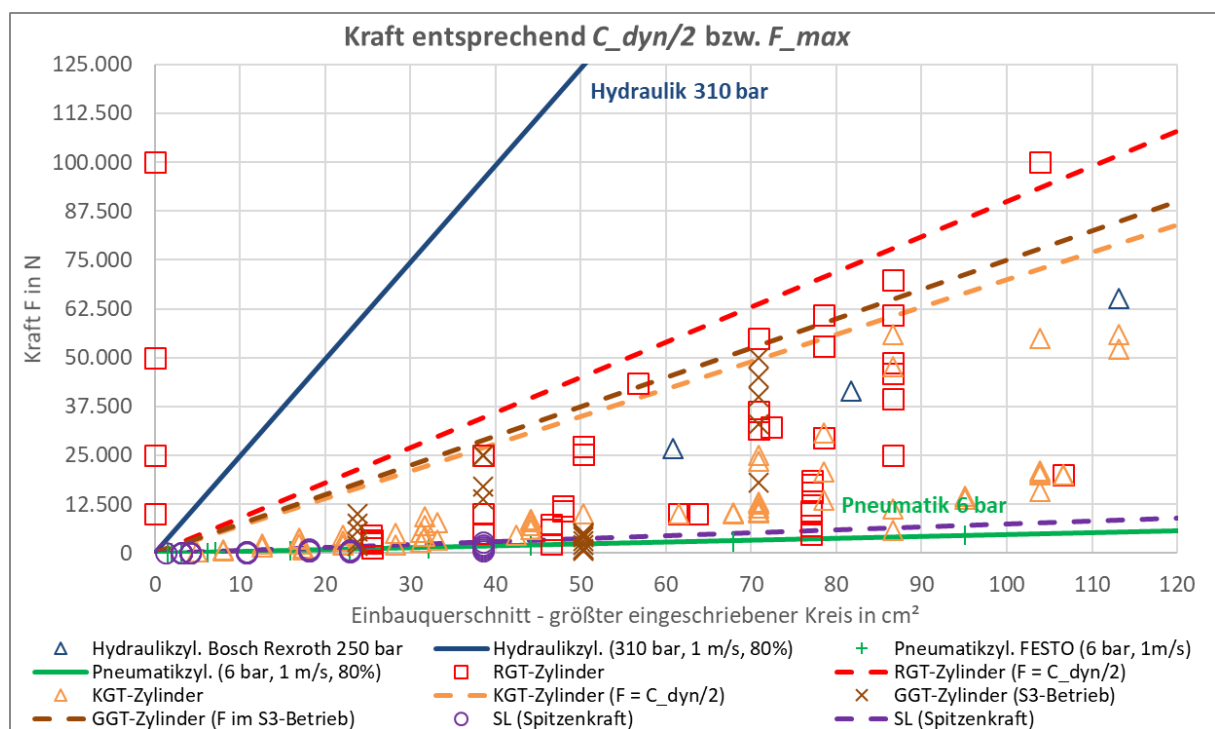
Abweichend von den Gewindespindelantrieben mit Wälzkontakten müssen die Gleitgewindetriebe (GGT) betrachtet werden. Für die entsprechenden Elektrozyylinder ist oftmals kein Formelwerk zur Lebensdauerprognose angegeben, bzw. auch nicht allgemeingültig verfügbar. Daher werden für die GGT-Zylinder die Lastfälle bezogen auf die angegebene Einschaltdauer eingeordnet. Dies ist begründet in den hohen Reibwerten im GGT, welche mit einer entsprechenden Erwärmung im Gleitkontakt, aber auch Belastung und Erwärmung des treibenden Motors verknüpft sind. Als Lastfall hoher Ausnutzung wird der Kurzzeitbetrieb (S3-Betrieb) und als Lastfall mit geringer Ausnutzung der Dauerbetrieb (S1-Betrieb) herangezogen.

Für den Solenoid-Linearmotor (SL) wird die Spitzenkraft (F_{\max}) als Äquivalent für den Lastfall mit hoher Ausnutzung bzw. die Dauernennkraft bei Kühlung durch natürliche Konvektion ($F_{\text{nat_Konv}}$) als Äquivalent für den Lastfall mit geringer Ausnutzung angesetzt. Die Spitzenkraft kann meist für einige Sekunden aufrechterhalten werden, die Dauerkraft im Dauerbetrieb. Bei Zwangskühlung oder Wasserkühlung sind höhere Dauerkräfte möglich.

In den folgenden Diagrammen sind zum Vergleich jeweils die Kennlinien der spezifischen, auf die Querschnittsfläche (größter eingeschriebener Kreis) bezogenen Aktorkräfte und Leistungen für Pneumatik- (grün) und Hydraulikzylinder (blau) sowie exemplarisch ausgewählte Pneumatik- (grüne Kreuze) und Hydraulikzylinder (blaue Dreiecke) aufgetragen. Für den jeweils betrachteten elektromechanischen bzw. direktelektrischen Aktortyp werden aus den aufgetragenen Datenpunkten der einzelnen Aktorexemplare Grenzgerade für die spezifische Kraft (entsprechend einem scheinbaren Druck $p_{\text{äq}}$ in N/cm^2) bzw. die spezifische Leistung $p_{\text{äq}}$ in W/cm^2 geschätzt und eingetragen. Diese dienen dem Vergleich der Kraft- und Leistungsdichte der Aktortypen. Für einige Aktoren lagen keine Daten für die Querschnittsfläche vor. Diese finden sich in den Diagrammen auf der Koordinate $x = 0 \text{ cm}^2$. Auch die spezifische Leistung bei niedriger Auslastung konnte nicht in jedem Fall berechnet werden. Die entsprechenden Elektrozyylinder sind im Diagramm mit einer Leistungsdichte von $y = 0 \text{ W}/\text{cm}^2$ angegeben.

Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt der Aktoren bis 120 cm^2 Querschnittsfläche, was einem maximalen Durchmesser von gut 12 cm entspricht.

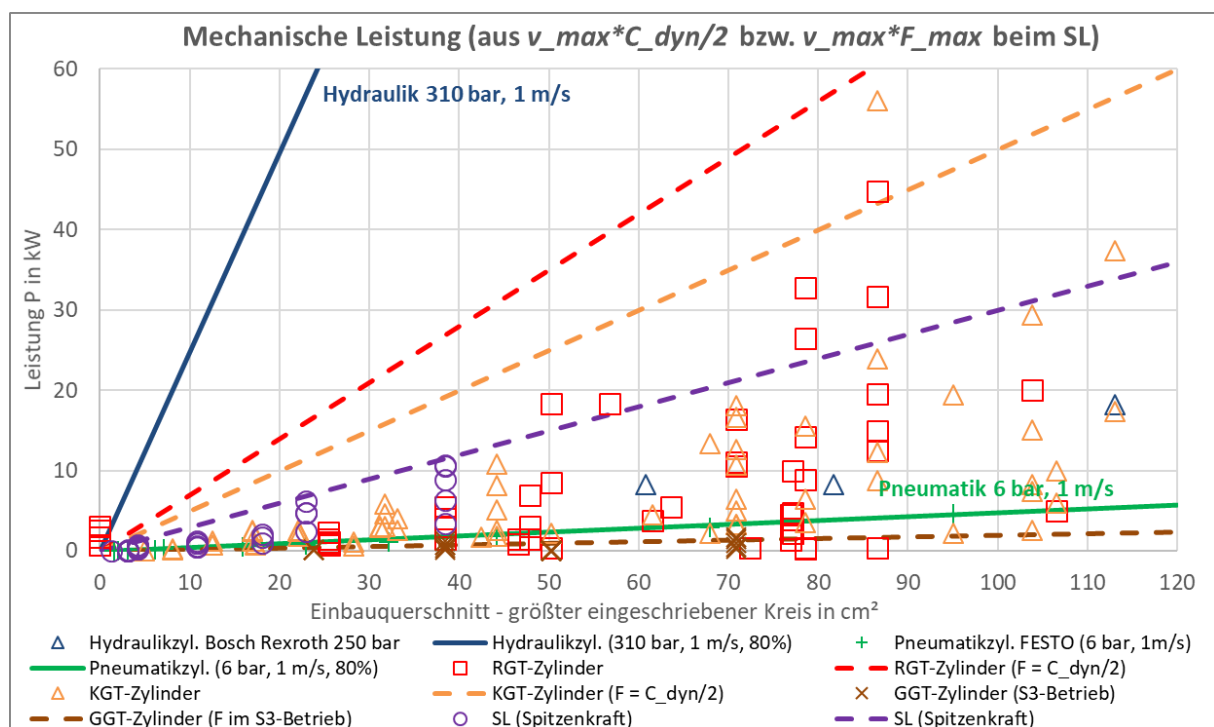
Abbildung 39: Spezifische Aktorkraft bei hoher Ausnutzung



Quelle: eigene Darstellung IMM

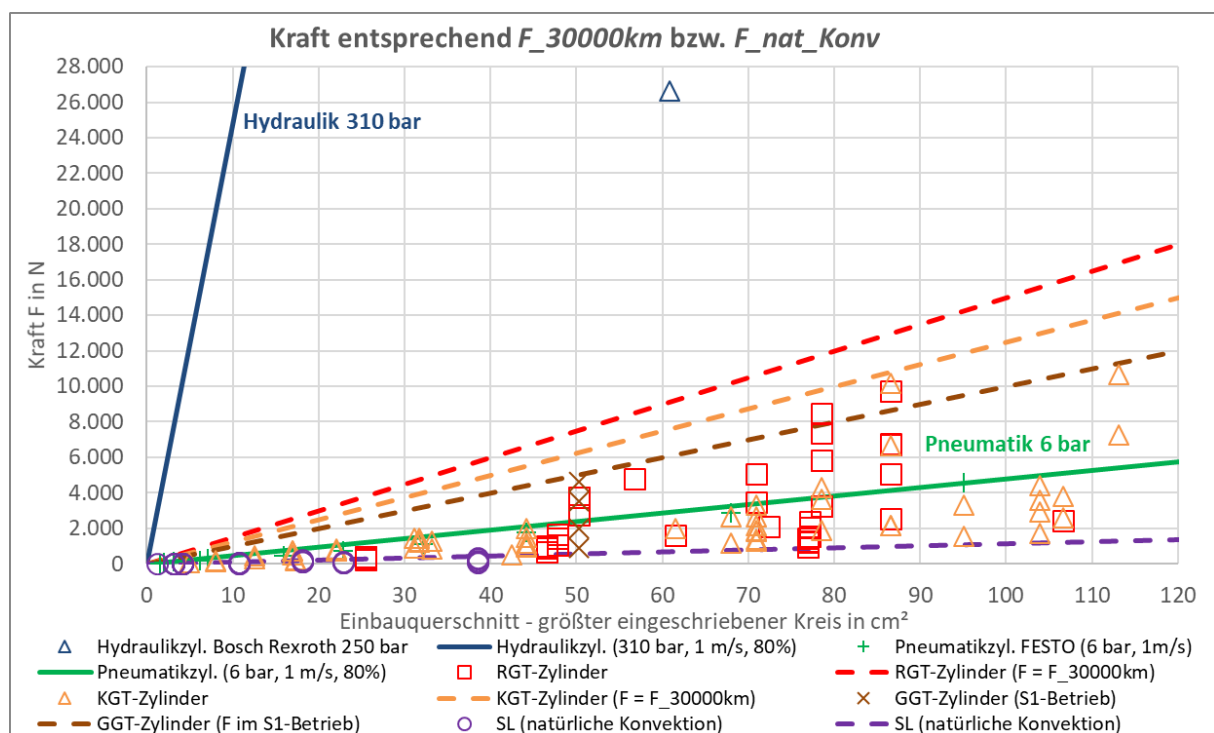
Theoretisch ist das hydraulische Antriebssystem mit 310 bar und 1 m/s allen anderen überlegen. Allerdings liegt der Normzylinder mit 250 bar Druckbeaufschlagung (blaue Dreiecke) bzgl. der Kraftdichte in einer ähnlichen Größenordnung wie die betrachteten Elektrozyylinder mit Gleitgewindetrieb (GGT), Kugelgewindetrieb (KGT) und Rollengewindetrieb (RGT). Die Elektrozyylinder-Typen decken alle den gleichen, weit gefächerten, Bereich der Kraftdichte ab. Bezüglich der auf den Aktorquerschnitt bezogenen Kraftdichte ist bei hoher Ausnutzung ein Ersatz von Hydraulikzylindern durch elektromechanische Zylinder möglich. Bei Pneumatikzylindern ergibt sich ein ähnliches Bild. Diese konkurrieren bzgl. der Kraftdichte neben allen Elektrozyylinder-Typen auch mit Linearmotoren (SL).

Abbildung 40: Spezifische Leistung bei hoher Ausnutzung



Quelle: eigene Darstellung IMM

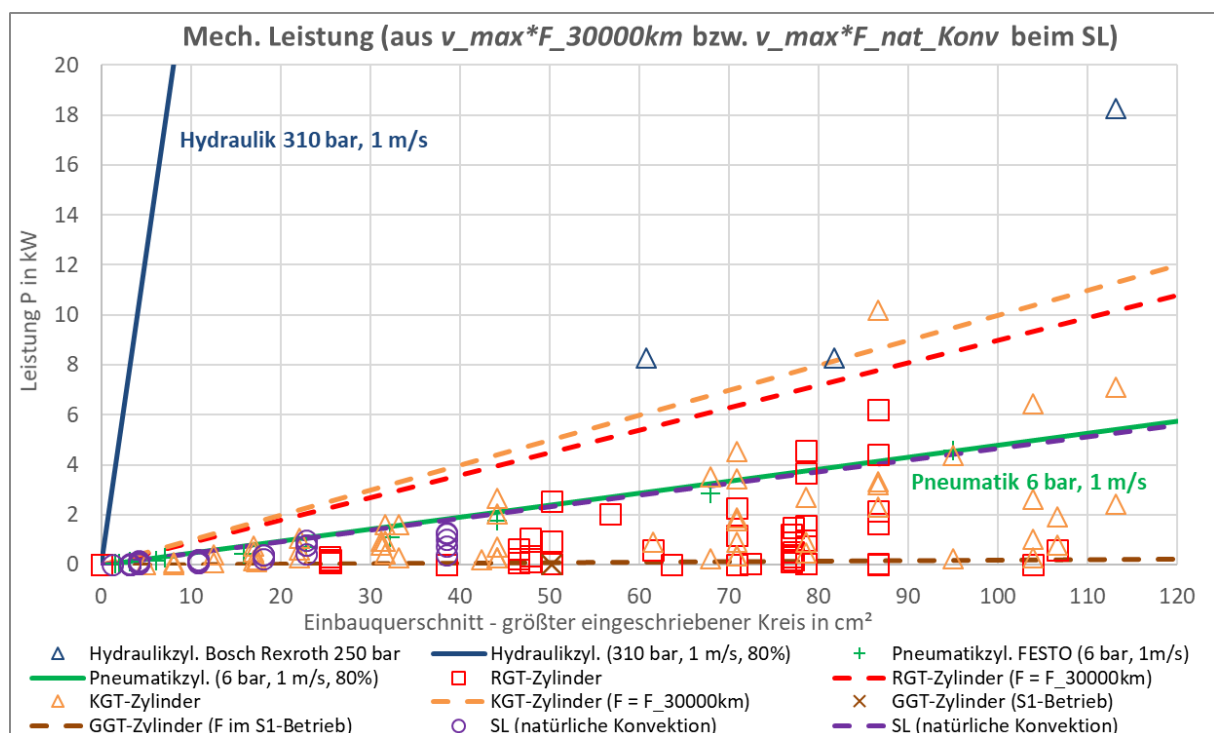
Die Unterschiede der Antriebssysteme bei hoher Ausnutzung zeigen sich bei Betrachtung der spezifischen Leistungsdichte. Wiederum ist die Hydraulik mit 310 bar theoretisch allen anderen Systemen überlegen. Die im Diagramm exemplarisch aufgeführte Baureihe von Normzylindern ist allerdings in der Vorschubgeschwindigkeit limitiert (nach Herstellerangabe standardmäßig ca. 0,3 m/s beim kleinsten Zylinder), was auch die spezifische Leistung auf vergleichsweise niedriges Niveau begrenzt. Bei größeren Zylinderquerschnitten ist die Leistung in Folge des maximalen Volumenstroms der Zuleitungen bzw. Anschlüsse limitiert (vgl. **Abbildung 43**). Die höchste Leistungsdichte erreichen RGT-Zylinder gefolgt von KGT-Zylindern und Linearmotoren. Letztere erreichen wegen der möglichen hohen Vorschubgeschwindigkeiten eine hohe Leistungsdichte. GGT-Zylinder können wegen der reibbehafteten Gleitpaarung zwischen Spindel und Mutter nur eine begrenzte Verlustleistung umsetzen, was die Vorschubgeschwindigkeit und damit die spezifische Leistung begrenzt. Wegen ihrer Robustheit und der relativ unkomplizierten Fertigung eignen Sie sich daher gut als Stellantriebe. Pneumatikzylinder stehen bzgl. Der spezifischen Leistung wiederum in Konkurrenz mit allen anderen Antriebssystemen.

Abbildung 41: Spezifische Aktorkraft bei geringer Ausnutzung

Quelle: eigene Darstellung IMM

Bei geringer Ausnutzung – also einer Auslegung auf lange Lebensdauer bzw. Dauerbetrieb mit Kühlung via natürlicher Konvektion bei Linearmotor und GGT-Zylinder – sind hydraulische Antrieb klar überlegen (siehe **Abbildung 41**). Hierbei kommt der Hydraulik der Vorteil der Trennung von Energiewandlung und Kühlfunktion im Aggregat und Rückumwandlung im Zylinder sowie die Unabhängigkeit der Lebensdauer von der anliegenden Last zu Gute. Demgegenüber müssen die Gewindespindelantriebe zum Erreichen einer großen Lebensdauer mit – bezogen auf die dynamische Tragzahl – deutlich geringeren Kraft- und Leistungsdichten betrieben werden. Die pneumatischen Antriebe stehen in Konkurrenz zu den elektromechanischen Antrieben. Einzig die betrachteten Solenoid-Linearmotoren sind bei Kühlung durch natürliche Konvektion bezogen auf ihre Kraftdichte unterlegen. Sie müssen mit geringeren Kräften betrieben werden, um die anfallende Stromwärme abführen zu können.

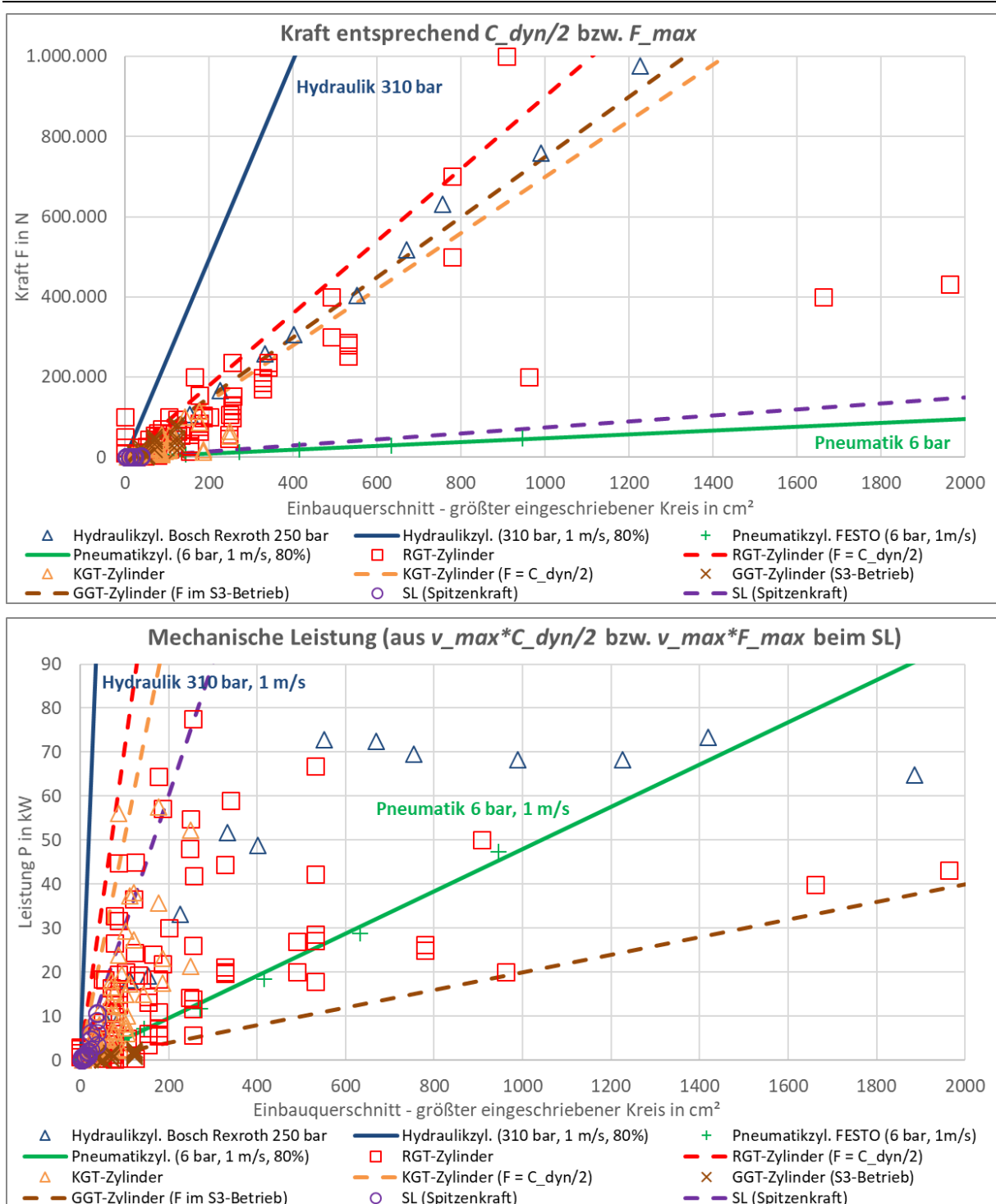
Abbildung 42: Spezifische Leistung bei geringer Ausnutzung



Quelle: eigene Darstellung IMM

Wird als Bezug die spezifische Leistung gewählt (siehe **Abbildung 42**), liegen Pneumatikzylinder und Linearmotoren gleichauf. Die Linearmotoren machen in diesem Fall die geringere Kraftdichte durch höhere Vorschubgeschwindigkeiten wett. In der Darstellung der Leistung bei geringer Ausnutzung fällt die begrenzte Leistungsdichte der GGT-Zylinder auf. Diese erreichen im Dauerbetrieb wegen der vergleichsweise hohen Reibwerte nur geringe Vorschubgeschwindigkeiten. KGT- und RGT-Zylinder erreichen die Leistungsdichte der exemplarisch dargestellten Normzylinder-Baureihe (Hydraulikzylinder) nicht.

Abbildung 43: Spezifische Aktorkraft und -leistung bei hoher Ausnutzung – gesamter betrachteter Bereich

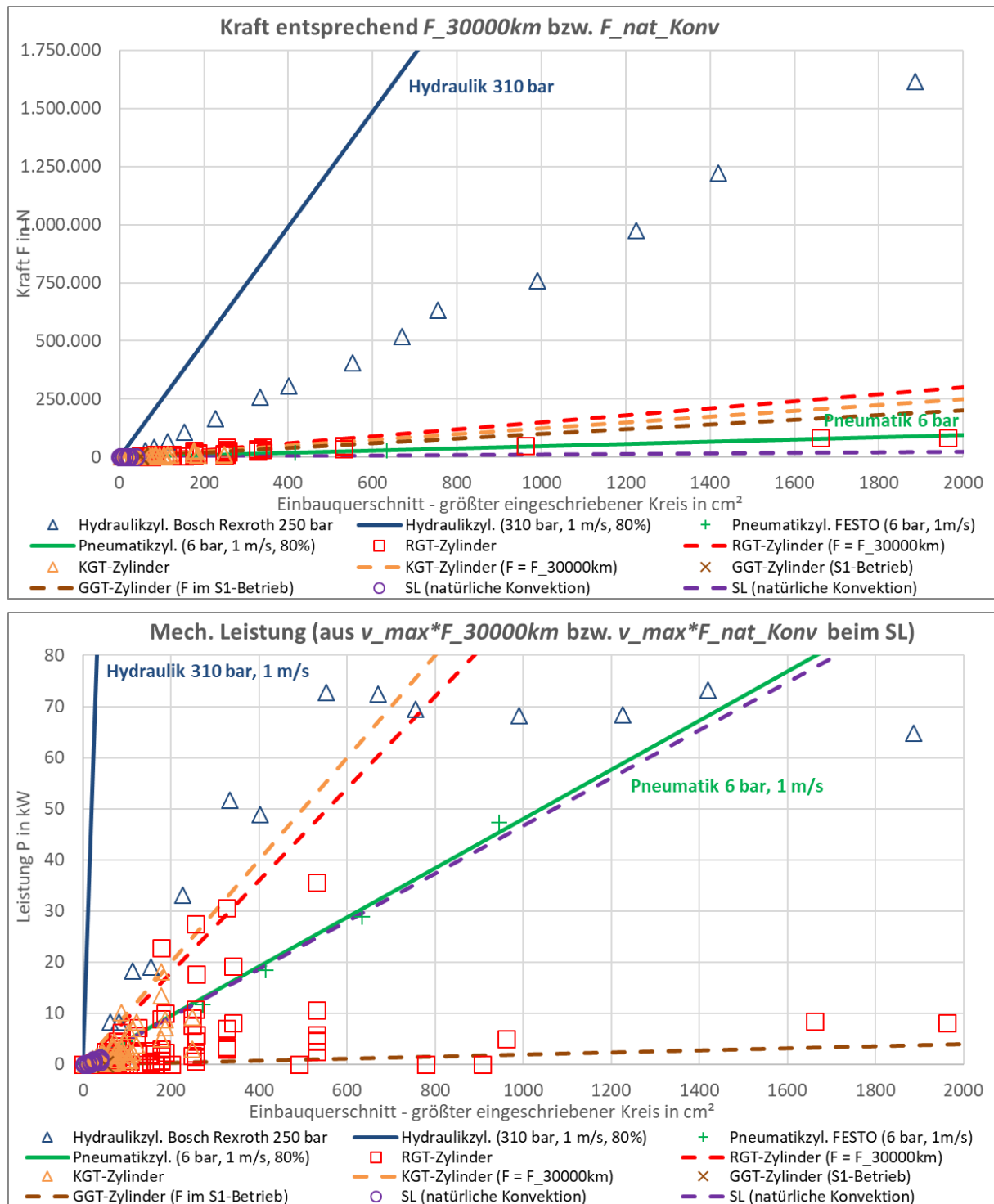


Quelle: eigene Darstellung IMM

Bei Betrachtung des gesamten untersuchten Kraftspektrums (siehe **Abbildung 43**) wird deutlich, dass – hohe Ausnutzung vorausgesetzt – hydraulische und elektromechanische Antriebe im Bereich bis 1000 kN konkurrieren. Bezogen auf die exemplarisch betrachtete Baureihe von Normzylindern sind in diesem Fall sogar wälzkontaktbehaftete Elektrozyylinder bezüglich der Leistungsdichte überlegen. Die Normzylinder erreichen eine maximale Leistung von ca. 70 kW, was letztlich aus den begrenzten Leitungsquerschnitten und damit dem limitierten Volumenstrom der zugeführt werden kann, resultiert. Bei größerer Pumpenleistung

und entsprechend dimensionierten Leitungsquerschnitten bietet die Hydraulik eine nicht durch die anderen Antriebssysteme erreichbare Kraft- und Leistungsdichte (vgl. Grenzgerade für Hydraulik bei 310 bar).

Abbildung 44: Spezifische Aktorkraft und -leistung bei geringer Ausnutzung – gesamter betrachteter Bereich



Quelle: eigene Darstellung IMM

Bei geringer Ausnutzung (siehe **Abbildung 44**) sind Hydraulikzylinder bezogen auf die Kraft- und Leistungsdichte klar im Vorteil.

Aus dem Vergleich wird deutlich, dass hydraulische Linearantriebe nach wie vor die größte Kraft- und Leistungsdichte (bezogen auf den Aktorquerschnitt) bereitstellen können. Die Substitution hydraulischer Linearantriebe in stationären Anwendungen ist aber möglich, wenn im Dauerbetrieb (geringe Ausnutzung) Abstriche bzgl. Kraft- und Leistungsdichte gemacht werden können. Bei hoher Auslastung sind Gewindespindeltriebe und RGT-, KGT, sowie GGT-Zylinder vielfach bereits konkurrenzfähig.

Grundlegend ist beim Einsatz elektromechanischer Aktoren die Auslegung bzgl. der Lebensdauer zu beachten, da sich daraus um den Faktor 10 bis 100 abweichende nutzbare Aktorkräfte und entsprechend abweichende Leistungsdichten ergeben können. Dabei ist das Lastkollektiv meist komplex und in vielen Fällen nur unzureichend oder gar nicht bekannt, was die Auslegung elektromechanischer Antriebe erschwert.

Pneumatische Linearantriebe sind technisch in vielen Fällen durch elektromechanische Zylinder oder Linearmotoren ersetzbar. Hier wird von den Herstellern der Elektrozyylinder und Linearmotoren häufig die mögliche Energieeinsparung sowie die erweiterte Funktionalität bezüglich der Bewegungsführung (z.B. Positioniergenauigkeit) als Argument für die höheren Investitionen gegenüber der Pneumatik angeführt. Abschließend sind in der folgenden Tabelle die in den oben aufgeführten Diagrammen angesetzten maximalen spezifischen Kraft- und Leistungsdichten der verschiedenen Antriebstechnologien zusammengefasst.

Tabelle 16: Vergleich der spezifischen flächenbezogenen Aktorkräfte und Leistungsdichten von Elektrozylindern, Solenoid-Linearmotoren, Hydraulikzylindern und Pneumatikzylindern

	spez. Kraft $p_{\dot{a}q}$ in N/cm^2	spez. Leistung $P_{\dot{a}q}$ in W/cm^2
Pneumatik: $p = 6 \text{ bar}$, $v = 1 \text{ m/s}$	48 N/cm^2	48 W/cm^2
Hydraulik: $p = 250 \text{ bar}$, $v = 1 \text{ m/s}$	2480 N/cm^2	2480 W/cm^2
Grenzgerade Gleitgewindetrieb (GGT) bei $F_{\dot{a}q}$ im S3-Betrieb	750 N/cm^2	20 W/cm^2
Grenzgerade Gleitgewindetrieb (GGT) bei $F_{\dot{a}q}$ im S1-Betrieb	100 N/cm^2	2 W/cm^2
Grenzgerade Kugelgewindetrieb (KGT) bei $F_{\dot{a}q} = \frac{1}{2} C_{dyn}$	700 N/cm^2	500 W/cm^2
Grenzgerade Kugelgewindetrieb (KGT) bei $F_{\dot{a}q} = F_{30000km}$	125 N/cm^2	100 W/cm^2
Grenzgerade Rollengewindetrieb (RGT) bei $F_{\dot{a}q} = \frac{1}{2} C_{dyn}$	900 N/cm^2	700 W/cm^2
Grenzgerade Rollengewindetrieb (RGT) bei $F_{\dot{a}q} = F_{30000km}$	150 N/cm^2	90 W/cm^2
Grenzgerade Solenoid-Linearmotor bei F_{max}	75 N/cm^2	300 W/cm^2
Grenzgerade Solenoid-Linearmotor bei F_{konv} (Konvektion)	11,5 N/cm^2	46,7 W/cm^2

Die maximale flächenbezogene spezifische Leistung für gängige pneumatische Linearantriebe wird im Rahmen dieser Studie in einer Größenordnung von 100 W/cm^2 festgelegt (Vgl. Abbildung 36). Dies entspricht bspw. einer Druckbeaufschlagung von 12 bar bei 1 m/s Vorschubgeschwindigkeit oder 6 bar und 2 m/s Vorschubgeschwindigkeit. Im Leistungsbereich

bis 100 W/cm^2 können auch alle anderen betrachteten Antriebssysteme eingesetzt werden. Der Überdeckungsbereich mit anderen Antrieben ergibt sich zudem aus den verfügbaren Baugrößen.

Hydraulische Aktoren erreichen theoretisch enorme Leistungsdichten – für den betrachteten Fall 310 bar bei 1 m/s ca. $2,5 \text{ kW/cm}^2$. Die in die Gegenüberstellung aufgenommenen Normzylinder weisen bei geringerem Druck und wegen ihrer robusten Konstruktion eine geringere flächenbezogene Leistungsdichte auf. Zudem fällt auf, dass es ab einem gewissen Kolbendurchmesser keinen weiteren Leistungszuwachs gibt. Die maximale Leistung der betrachteten Zylinder liegt bei ca. 70 kW. Vermutlich liegen konstruktive (bspw. Dichtung) oder leistungsmäßige (typische Pumpenleistung bzw. möglicher Volumenstrom der Zuleitung) Limitierungen zu Grunde. Kundenspezifisch sind laut Anmerkung im Katalog abweichende (höhere) Kennwerte möglich. Rollengewindetribe kommen den Hydraulikzylindern bzgl. der Leistungsdichte mit ca. $0,7 \text{ kW/cm}^2$ am nächsten. Da einige RGT- und auch KGT-Zylinder mit der Annahme $F = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Dyn}}$ unterschätzt wurden, wird die maximale Leistungsdichte der elektromechanischen Zylinder auf 1 kW/cm^2 (Vgl. Abbildung 36) aufgerundet.

Im Folgenden wird noch ein Vergleich der spezifischen Aktorkräfte und -leistungen bezogen auf die Aktormasse durchgeführt. Dieser soll allerdings nur als grobe Orientierung dienen, da nicht für alle Elektrozyylinder die Motormasse bekannt war, bzw. unterschiedlich große (schwere) Motoren am gleichen Zylinder eingesetzt werden können. Die Betrachtung ist exemplarisch für 200 mm Hub durchgeführt worden. Für einige Aktoren lagen keine Daten zur Masse vor. Die folgenden Diagramme (**Abbildung 45**, **Abbildung 46**) zeigen jeweils Kraft und Leistung über der Aktormasse (bis 1200 kg) für die Auslegungen mit hoher und niedriger Ausnutzung. In **Abbildung 47** und **Abbildung 48** sind Kraft und Leistung für Aktoren bis 10 kg Masse aufgetragen.

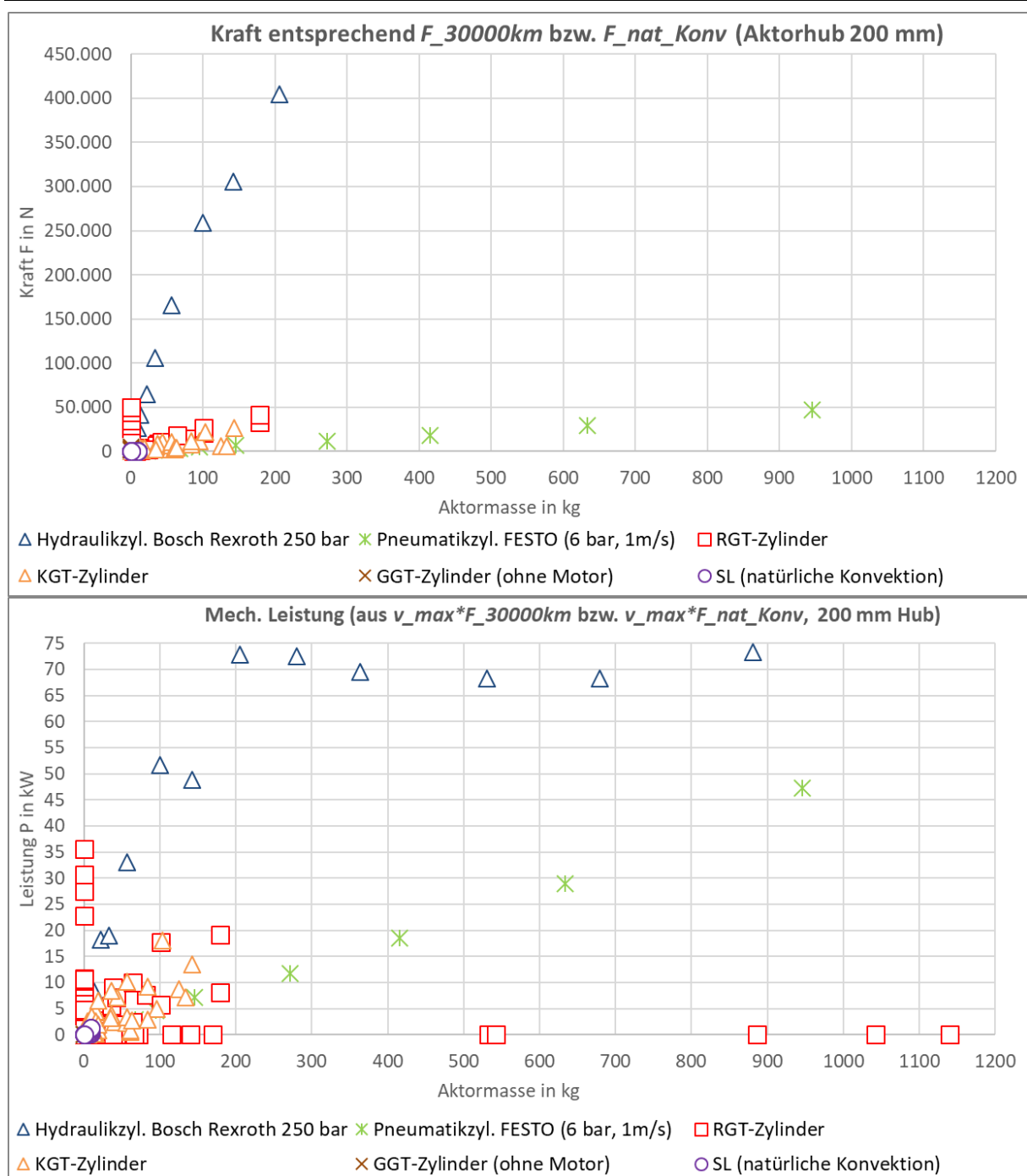
Abbildung 45: Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei hoher Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor)



Quelle: eigene Darstellung IMM

Bei Betrachtung der Kräfte und Leistungen über der Aktormasse zeigt sich die Überlegenheit der hydraulischen Antriebe. Besonders deutlich wird diese in den Diagrammen für geringe Ausnutzung (siehe **Abbildung 46**). Hydraulische Aktoren sind prädestiniert für Mobilanwendungen.

Abbildung 46: Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei geringer Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor)



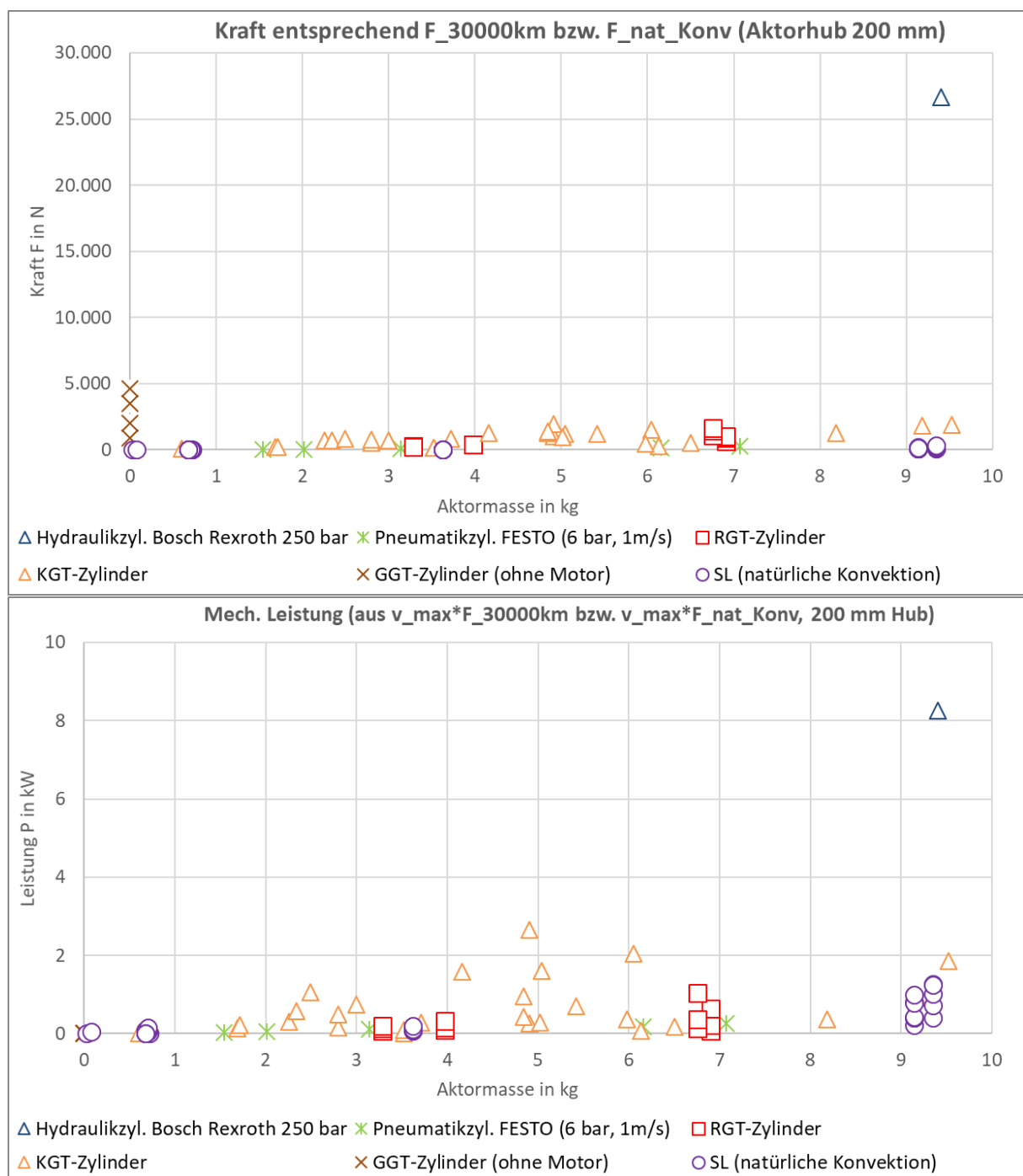
Quelle: eigene Darstellung IMM

Abbildung 47: Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei hoher Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor) – bis 10 kg Aktormasse



Quelle: eigene Darstellung IMM

Abbildung 48: Aktorkraft und -leistung über Aktormasse bei geringer Ausnutzung (Elektrozylinder teilweise mit und ohne Antriebsmotor) – bis 10 kg Aktormasse



Quelle: eigene Darstellung IMM

A.2 Einzelbewertung der Maßnahmen

Die nachfolgenden Tabellen stellen die Einzelbewertung der Maßnahmen dar, aus denen sich im Ergebnis die Bewertung des energetischen Einsparpotentials ergibt.

A.2.1 Potentiale durch Technologieupgrade

Tabelle 17: Potentialbewertung der Maßnahmen „Technologieupgrade“

		lange Maschinen-lebensdauer	hohe Einschaltdauer	große Einsparung	große Verbreitung	große Leistung	schnelle Realisierung	Ergebnis	Literaturquellen:
	Gewichtung: in %	17	20	20	23	13	7		
	Gesamt möglich:	5	5	5	5	5	5	5,0	
Stationärhydraulik									
SH	Umstellung von IE1 auf IE3/4 Motoren	5	5	1	5	3	2	3,7	(DIN EN 60034-30-1, 2014, pp. 60034-30–31)
SH	Spritzgießmaschinen - Umstellung auf Verdrängersteuerung	5	4	4	5	3	2	4,1	(Helbig, 2007)/(Willkomm et al., 2014)
SH	Tiefziehpressen - Verdrängersteuerung im Ziehkissen	5	5	5	4	5	1	4,5	(Lohse et al., 2015b)/(Kohno & Somukawa, 2014)
SH	Anpassung der Druckmedien / Viskositätsklasse	5	5	2	5	5	4	4,3	(S. N. Herzog et al., 2009)/(S. N. Herzog et al., 2009)/(Bock et al., 2018)/(S. Herzog & Gregg, 2008)/(Dustman, 2006) (Markus Scherer et al., 2004)/(Placek et al., 2003)/(Alibert & Schimmel, 2012)/(Neveu et al., 2008)
SH	Einsatz teillasteffizienterer Pumpenkonzepte	5	5	2	3	5	2	3,7	(Willkomm et al., 2014)WiWw14/(Green et al., 2018)
Mobilhydraulik									
MH	Bagger/Radlader: Individualisierung Ventil- und Pumpenstrukturen	4	3	5	4	4	3	3,9	(Lübbert, Sitte, & Weber, 2016)/(Rahmfeld & Weber, 2004)/(Finzel, 2011)/(Eriksson et al., 2007)/(Karvonen, 2016)/(Inderelst, 2013)/(Inderelst, 2014)/(Zimmerman et al., n.d.)/(Martin Scherer, 2015)/(S. Zhang et al., 2017)

MH, SH	aktive Regelung von Nebenverbrauchern	4	3	2	4	1	3	2,9	(Shabi, 2020)/(Steinert, 2013)
MH	Lösungen für elektrische Primärversorgung	4	3	3	2	3	1	2,8	(Yoon et al., 2013)
MH	Hybridisierung Bagger/Radlader (+Betriebspunktoptimierung)	4	3	3	3	5	3	3,4	(Schneider et al., 2016)/(Brun et al., 2015)/(Ge et al., 2017)
Pneumatik									
P	Kompressorauslegung	5	4	3	4	3	2	3,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Agricola et al., 2005)/(Dindorf, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Austausch von Trocknern	5	4	1	4	1	3	3,1	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Dimensionierung von Aufbereitungskomponenten	5	4	1	3	0	3	2,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Dimensionierung des Leitungsnetzes	5	5	1	2	1	1	2,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Einsatz von Kompressoren mit Wärmerückgewinnung	5	5	4	3	3	2	3,9	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
P	Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren	5	4	3	3	3	2	3,5	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Dindorf, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Reduzierung der Aufbereitung der Druckluft	5	5	2	2	3	3	3,3	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
P	regelmäßige Wartung der Druckluft-Aufbereitung	5	5	2	5	3	5	4,1	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
P	korrekte Dimensionierung der Druckluft-Leitungen	5	5	2	5	3	1	3,9	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)

P	Beseitigung von Leckagen im Netz	5	5	2	5	3	5	4,1	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(Agricola et al., 2005)
P	Einsatz Energiesparschaltungen /Nutzung Expansionsenergie	5	4	5	4	3	3	4,1	(Hepke, 2017)/(Boyko, 2020)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
P	bewegte Massen minimieren/ Reibung verringern	3	3	4	2	1	3	2,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)

A.2.2 Potentiale durch Regelungs- und Steuerungstechnik

Tabelle 18: Potentialbewertung der regelungs- und steuerungstechnischen Maßnahmen

		lange Maschinenlebensdauer	hohe Einschaltdauer	große Einsparung	große Verbreitung	große Leistung	schnelle Realisierung	Ergebnis	Literaturquellen:
	Gewichtung in %	17	20	20	23	13	7		
	Gesamt möglich:	5	5	5	5	5	5	5,0	
	Anwendungspotentiale								
P	Support bei energieeffizienter Systemauswahl	5	5	4	5	5	5	4,8	(Agricola et al., 2005)
MH	Bagger-Radlader: Vermeidung Leerlauf	5	4	5	5	3	3	4,4	(Fecke, 2018)
SH,M H	zustandsorientierte Wartungskonzepte (Schläuche, Filter, ...)	5	4	3	5	5	4	4,3	(Smith, 2012)/ /LABB18(Leutenegger et al., 2018)/
SH	Peak-shaving: Reduzierung Spitzenlasten (elektromechanische Pressen, Stanzeinrichtungen)	5	5	2	3	5	3	3,8	(Ristic & Wahler, 2018)/(Putz & Blau, 2016)
b	Bedarfsgerechte Steuerung von Nebenverbrauchern	3	3	3	5	2	3	3,3	(Steinert, 2013)/(Shabi, 2020)
SH, MH, P	Reduzierung Verluststellen beim Entwurf	3	3	2	5	3	2	3,2	

P	optimierte Bewegungsprofile einstellen	3	3	2	2	3	5	2,7	(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)
P	übergeordnete Kompressorsteuerungen	5	5	3	3	3	3	3,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)
P	Netzdruckabsenkung	5	5	2	3	3	5	3,7	(Dindorf, 2012)/(EnEffAH Projektkonsortium, 2012)/(McKane & Hasanbeigi, 2010)/(Radgen & Blaustein, 2001)

A.2.3 Potentiale durch Substitution

Tabelle 19: Potentialbewertung der Energieeinsparungen durch Substitutionsmaßnahmen

	lange Maschinenlebensdauer	hohe Einschaltdauer	große Einsparung	große Verbreitung	große Leistung	schnelle Realisierung	Ergebnis:	Literaturquellen
Gewichtung in %:	17	20	20	23	13	7		
Gesamt möglich:	5	5	5	5	5	5	5,00	
Stationärhydraulik								
mech. Getriebe in Förderanlagen	3	4	4	2	2	3	3,	
mech. Kokillenzillation	5	5	2	1	4	1	3,1	
mech. Tiefziehpressen	4	5	3	4	5	2	4,0	
mech. Linearantrieb Spritzeinheit SGM	5	3	2	5	3	2	3,5	
mech. Linearantrieb Schließereinheit SGM	5	3	2	5	3	2	3,5	
Rotationsantrieb Schnecke SGM	5	3	5	5	4	3	4,3	
Mobilhydraulik								
Arbeitshydraulik Kleinbagger	2	3	4	1	1	4	2,4	(N, 2019)
Fahrertriebe	3	3	2	5	4	2	3,3	(Schröter et al., 2014)
Vakuumtechnik								
Einsatz Vakuumpumpen	3	3	2	3	2	3	2,7	(N, 2020c)
kleine, dezentrale Vakuumpumpen	3	2	5	5	0	4	3,3	(N, 2020c)/(Schmalz, 2020)/(EtaOpt, 2020)

