

Handbuch Energieeffizienz

Methoden zur Steigerung der Energieeffizienz in Industrieunternehmen



Impressum

Handbuch Energieeffizienz

Herausgeber:

Bosch Rexroth AG
Drive & Control Academy
Bahnhofplatz 2
97070 Würzburg, Germany

Nachdruck, Vervielfältigung und Übersetzung, auch auszugsweise, nur mit unserer vorherigen schriftlichen Zustimmung und mit Quellenangaben gestattet.

Wir übernehmen keine Haftung für die Übereinstimmung des Inhalts mit den jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften.

Änderungen vorbehalten.

1. Auflage (März 2017)

Materialnummer R901455390

ISBN 978-3-9816398-8-9

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7	Teil B: Rexroth 4EE – die Formel für energieeffiziente Technik	53
Einleitung.....	9		
<u>Teil A: Energie- und Projektmanagement</u>	<u>15</u>		
1 Ganzheitlicher Ansatz beim Energiemanagement.....	17	4 Energieeffizienz bei Maschinen, Anlagen und Einrichtungen (MAE)	55
1.1 Regeln zur Berechnung der CO ₂ -Emissionen	17	4.1 Energieverbrauch der Industrie	55
1.2 Zielableitung, Potenzialfindung und Monitoring im internationalen Konzern – der Kern des GoGreen-Projekts	19	4.2 Hohe Verluste = Hohes Einsparpotenzial	58
1.3 Weitere notwendige Elemente zur Komplettierung des Systems	25	4.3 Kostenbetrachtung	59
		4.4 Ansätze zur Reduzierung von Kosten und Verbrauch.....	61
		4.5 Schlussfolgerung	62
2 Projektmanagement für ganzheitliche Energieeffizienz-Potenzialanalysen	29	5 Rexroth 4EE.....	63
2.1 Projektmanagement als Werkzeug zum Erfolg.....	29	5.1 Rexroth 4EE – die erste universelle Systematik	64
2.2 Organisation und Vorbereitung.....	29	5.2 Zusammenfassung.....	67
2.3 Vorgehensplanung anhand des Phasenmodells	31		
2.4 Ganzheitliche Energieeffizienz-Potenzialanalyse auf Basis von Rexroth 4EE.....	35	6 Beispiele innovativer Produkte und Lösungen von Bosch Rexroth	69
2.5 Zusammenfassung.....	42	6.1 Einleitung	69
3 Einfluss der Mitarbeitersensibilisierung auf den Energieverbrauch	43	6.2 Komponenten und Systeme von Rexroth mit hohem Wirkungsgrad	70
3.1 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch.....	43	6.3 Systemlösungen für energieeffizientes Design.....	74
3.2 Was hindert den Menschen daran, Energie zu sparen?	44	6.4 SPS-Funktionen für Monitoring und Controlling.....	77
3.3 Einflussnahme auf das Mitarbeiterverhalten	45	6.5 Vollintegrierte Hydraulik – Energieeffizienz auf Antriebsebene.....	80
3.4 Entwickeln von Verhaltensgewohnheiten durch Information und Motivation	46	6.6 Unterschiede zwischen traditioneller Hydraulik und Sytronix-Lösungen	81
3.5 Beispiele aus der Praxis.....	50	6.7 Vorteile der drehzahlvariablen Pumpenantriebe Sytronix	85
		6.8 Unterstützung bei der Systemfindung	86
		6.9 Innovationen bei der Sytronix-Produktgruppe.....	89
		6.10 Verfügbarkeit von Sytronix in Systemlösungen	91
		6.11 Umrüstung eines Bearbeitungszentrums auf Sytronix	94

6.12 Die Gesamtmaschine im virtuellen Blick	95	12 Reinigungstechnik	147
6.13 Ausblick: Vernetzung eröffnet neue Potenziale	100	12.1 Einleitung	147
7 Industrie 4.0 – Vernetzung für die nächste Stufe der Energieeffizienz.....	101	12.2 Prozessschritte bei der Reinigung.....	147
7.1 Energetische Betrachtung der gesamten Fabrik.....	101	12.3 Allgemeine Einsparpotenziale bei Reinigungsanlagen	148
7.2 Data Analytics Server	102	12.4 Einsparpotenziale bei der Spritzreinigung ...	149
7.3 Open Core Engineering – die Brücke zur IT-Welt.....	103	12.5 Beispiele aus der Praxis	150
7.4 Mit offenen Standards Spitzenlasten reduzieren	104	12.6 Forschungsprojekt zur Untersuchung innovativer Maßnahmen	152
Teil C: Applikation energieeffizienter Technik in ausgewählten Maschinengruppen ...	105	13 Lackiertechnik.....	153
8 Allgemeine Energieeffizienz-Ansätze für Maschinen.....	107	13.1 Lackier- und Beschichtungsprozesse	153
8.1 Neuanschaffung oder Nachrüstung?	107	13.2 Allgemeine Einsparpotenziale bei Lackieranlagen.....	153
8.2 Die Erfahrungsbasis	108	13.3 Energieeinsparung durch Prozessoptimierung	154
8.3 Zusammenfassung.....	116	13.4 Beispiele aus der Praxis	156
9 Umformen.....	117	14 Prüftechnik	161
9.1 Einleitung	117	14.1 Einleitung	161
9.2 Prozessschritte bei der Umformung.....	118	14.2 Allgemeine Einsparpotenziale.....	162
9.3 Grundsätzlicher Vergleich der Pressentypen.....	119	15 Montage und Handling	165
9.4 Allgemeine Einsparpotenziale	122	15.1 (Band)-Förderanlagen	166
9.5 Einsparpotenziale bei blechumformenden Werkzeugen	123	15.2 Halten, Bewegen, Schrauben – elektrisch oder pneumatisch?.....	168
9.6 Einsparpotenziale bei hydraulisch betriebenen Aggregaten	126	15.3 Montageumfeld – Beleuchtung, Raumluftechnik (RLT).....	169
9.7 Beispiele aus der Praxis	128	15.4 Messen.....	169
10 Wärmebehandlung	129	15.5 Zusammenfassung.....	170
10.1 Einleitung	129	Teil D: Energieeffizienzanalyse der Prozesskette	171
10.2 Allgemeine Einsparpotenziale bei Wärmebehandlungsanlagen.....	131	16 Vorgehensweise bei der Maschinenanalyse.....	173
10.3 Beispiele aus der Praxis	132	16.1 Bestandsaufnahme der Maschinen und Auswahl der Messobjekte	173
10.4 Zusammenfassung.....	135	16.2 Energetische Bewertung einer Maschine ohne Messung (Precheck)	176
11 Zerspanen	137	16.3 Messgeräte und Messprinzipien.....	178
11.1 Einsparpotenziale verschiedener Maschinen- gruppen und Beispiele aus der Praxis	137	16.4 4EE Data Management Suite	181
11.2 Einsparpotenziale durch Zerspanungs- technologie und Anlagennutzung	143	16.5 Maschinenanalyse am Beispiel einer Werkzeugmaschine	185
11.3 Zusammenfassung.....	146	16.6 Zusammenfassung.....	192

17 Potenzialbewertung eines realen Wertstroms... 193	Teil H: Anhang249
17.1 Schulungen schaffen die Wissensbasis 193	
17.2 Briefing der Teilnehmer 194	23 Glossar..... 251
17.3 Bewertung eines Wertstroms in der Fertigung 196	24 Im Buch verwendete Quellen 255
17.4 Zusammenfassung..... 198	25 Autoren und Redaktion 257
18 Maschinenumbauten und CE-Kennzeichnung ... 199	26 Stichwortverzeichnis..... 263
<u>Teil E: Energieeffiziente Infrastruktur203</u>	
19 Energieeffiziente Infrastruktur 205	
19.1 Bedeutung der Infrastruktur bei der Verbesserung der Energieeffizienz 205	
19.2 Erhebung von infrastrukturellen Daten..... 206	
19.3 Druckluftsysteme 207	
19.4 Heizungs- und Belüftungsanlagen..... 211	
19.5 Beleuchtung 217	
<u>Teil F: Ganzheitliche Energieeffizienz- analyse im GoGreen-Projekt219</u>	
20 Beispiele ganzheitlicher Werksanalysen 221	
20.1 Werk Glenrothes (Schottland) 221	
20.2 Werk Blaj (Rumänien)..... 226	
20.3 Werk Ketsch (Deutschland)..... 230	
<u>Teil G: Ausblick.....233</u>	
21 Ausgewählte Forschungsprojekte 235	
21.1 MAXIEM 236	
21.2 FOREnergy 237	
21.3 ETA-Fab 238	
21.4 SynErgie 240	
21.5 Phi-Factory 242	
22 Ausblick - innovative Handlungsfelder 243	
22.1 Energieverbrauch der Deutschen Industrie 243	
22.2 COP 21 - Konferenzbeschluss 2015 in Paris zur Decarbonisierung..... 244	
22.3 Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung der Methodik..... 245	
22.4 Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung des Standes der Technik 247	

Vorwort

Liebe Leser,

mit Beginn des 21. Jahrhunderts hat das Thema Energieeffizienz, das neben der regenerativen Stromerzeugung die zweite große Säule der Energiewende darstellt, derart an Bedeutung gewonnen, dass heute kaum ein Unternehmen an der Energieeffizienzsteigerung vorbeikommt.

Die Bosch Rexroth AG als ein Anbieter für Drive- and Control-Systeme hat hinsichtlich Energieeffizienz zahlreiche innovative Lösungen für elektrische und hydraulische Antriebe und Steuerungen im eigenen Produktportfolio. Viele Lösungen wurden seit vielen Jahren mit der Rexroth-4EE-Systematik (Rexroth 4EE: Die Gesamtmaschine im virtuellen Blick) entwickelt und eingeführt.

Auch die Bosch Rexroth AG hat sich selbstverpflichtet, den relativen CO₂-Ausstoß weltweit bis 2020 um 20 Prozent zu senken und dazu im Jahr 2011 das Projektteam „GoGreen“ eingerichtet. Im Jahr 2016 wurde dieses Ziel auf 35% verschärft. Der Hauptfokus war von Beginn an auf die Steigerung der Energieeffizienz und in zweiter Linie auf die Steigerung des Anteils an regenerativer Energie gesetzt. Das neu eingerichtete Projektteam „GoGreen“ sollte die Entfaltung der Ziele auf die Standorte, Aufdeckung der Potenziale, Umsetzungsbegleitung und die Implementierung innovativer Lösungsansätze sicherstellen.

Zu Beginn hatte das zentrale Kernteam von GoGreen geeignete Methoden und Techniken entwickelt und implementiert. Dazu gehörten

- ▶ ganzheitliche Potenzialanalysen an den Standorten,
- ▶ Zielentfaltungs- und Controlling-Prozesse,
- ▶ die Entwicklung von technischen Lösungen sowie
- ▶ die Projektbegleitung einschließlich Change Management.

Um die Methoden und Techniken in die Organisation zu implementieren, wurde eine umfangreiche Schulung für

die Projektbeteiligten durchgeführt und die Funktion des Energiemanagers der Werke neu geschaffen. Die modular aufgebauten Schulungsunterlagen haben sich während der Projektlaufzeit von sieben Jahren stetig zu einer „Best Practice“ weiterentwickelt. Mittlerweile hat die Reife der Schulungsunterlagen einen Stand erreicht, der eine Ausgabe in Buchform sinnvoll macht.

Mit diesem Buch wollen wir die gewonnenen Erkenntnisse einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich machen und Ihnen Methoden zeigen, wie Sie das Thema Energieeffizienz in Ihr Unternehmen integrieren können. Das Vorgehen von Rexroth zur Umsetzung der CO₂-Ziele wurde auch über die Firmengrenzen hinaus bekannt und hat das Interesse von Fachleuten anderer Unternehmen an unserer Vorgehensweise geweckt. Das Projektteam „GoGreen“ nahm bereitwillig auch externe Schulungsteilnehmer in der internen Ausbildung auf. Rexroth ist bereit, das erworbene Wissen mit diesem Buch und einem entsprechenden Schulungsangebot an weitere Energiemanager und Umweltschutzbeauftragte von Industrieunternehmen sowie Prüf- und Beratungsunternehmen weiterzugeben. Unternehmer und Werkleiter, die ebenfalls die Reduktion des CO₂-Ausstoßes oder der Energiekosten als Handlungsfeld sehen und professionelle Unterstützung zur Zielplanung und dem Change Management suchen, können sich mit diesem Buch Anregungen und Hilfestellungen holen. Zusätzlich zu diesem Buch können wir gerne auch beratend den Prozess begleiten. Das Projektmanagement setzt zertifizierte Projektmanager ein.

Für Projektleiter, die die unternehmensweite Umsetzung von Energieeffizienzzielen verfolgen, ist dieses Buch ideal geeignet. Gerne tauscht unser Projektleiter des Projektes „GoGreen“ seine Projekterfahrung aus.

Das Projektteam „GoGreen“ hat bereits bei der Pilot-Potenzialanalyse im Werk Elchingen (Produkte:

Hydraulikpumpen und -motoren) eine erhebliche Lücke zwischen dem technisch-wirtschaftlich Machbaren und dem allgemein verfügbaren Stand der Technik erkannt. Gemeinsam mit Professor Abele vom Institut PTW der TU Darmstadt und Herstellern von Produktionseinrichtungen, wie wir sie in unseren Werken einsetzen, wurde die innovative η -Forschungsfabrik (ETA-FAB) der TU Darmstadt initiiert und erfolgreich aufgebaut. Wissenschaftler und Entwickler finden in diesem Buch zahlreiche

Anregungen für weitere Entwicklungen von energieeffizienten Innovationen.

Der Geltungsbereich des Buches ist hinsichtlich der Industriebranchen nicht eingeschränkt, da der methodische Ansatz übertragbar ist. Wir freuen uns, wenn Sie durch dieses Buch Anregungen für Ihr Unternehmen erhalten und wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und Erfolg bei der Umsetzung der vorgestellten Maßnahmen.

Rolf Najork (Vorstandsvorsitzender)
Dr. Bertram Hoffmann (Vorstand) Bosch Rexroth AG,
Lohr am Main

1 Ganzheitlicher Ansatz beim Energiemanagement

Autor: Leo Pototzky

Wie im Kapitel „Umsetzungskonzept Bosch Rexroth AG: Projekt GoGreen und Energieeffizienz mit Rexroth 4EE“ auf Seite 11 beschrieben, hat Bosch Rexroth zur Verfolgung und Umsetzung der Klimaschutz-Ziele und der Doppel-Strategie das Projekt GoGreen gestartet. In diesem Kapitel wird erläutert, wie dieses Projekt

„funktioniert“ und wie es grundsätzlich organisiert wurde. Das Kapitel „Projektmanagement für ganzheitliche Energieeffizienz-Potenzialanalysen“ auf Seite 29 geht im Folgenden dann auf die Projektmanagement-Methoden ein.

1.1 Regeln zur Berechnung der CO₂-Emissionen

Nichts geht ohne Ziel und ohne Kennzahl

Um die Leistung der CO₂-Emissionen bzw. deren Verminderung zu messen, hat Bosch die Kennzahl CO₂rel festgelegt:

$$\text{CO}_2\text{rel} = \text{CO}_2\text{gesamt} / \text{NGU} - \text{MAT} \text{ [t CO}_2\text{/Mio. €]}$$

Die CO₂-Emission in Tonnen wird über Emissionsfaktoren berechnet und setzt sich z. B. aus der Verbrennung von Energieträgern wie Gas oder auch aus dem Verbrauch von Strom zusammen. Diese Emission wird bezogen auf die Wertschöpfung (NGU - MAT = Nettogesamtumsatz minus Material). Die Wertschöpfung drückt aus, welcher Wert einem Produkt im Werk „hinzugefügt“ wurde. Diese betriebswirtschaftliche Formel zeigt einerseits die Verminderung der Emission und berücksichtigt andererseits Veränderungen wie z. B. das Wachstum einer Firma.

Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Kennzahl durch ökonomische Einflussfaktoren (Preise, Verlagerung in Länder mit hohen Emissionsfaktoren wie z. B. China) verändern kann. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, weitere technische Kennzahlen heranzuziehen, auf die später eingegangen wird.

Bosch hat sich zum Ziel gesetzt, die Kennzahl CO₂rel bis zum Jahr 2020 um 35% zu reduzieren.

Neben der oben erläuterten Berechnung der CO₂-Emissionen hat Bosch noch eine Reihe weiterer Regeln in einem Leitfaden definiert, so z. B. auch die Abgrenzung (Scope) der Emissionen unterschiedlicher Verursacher.

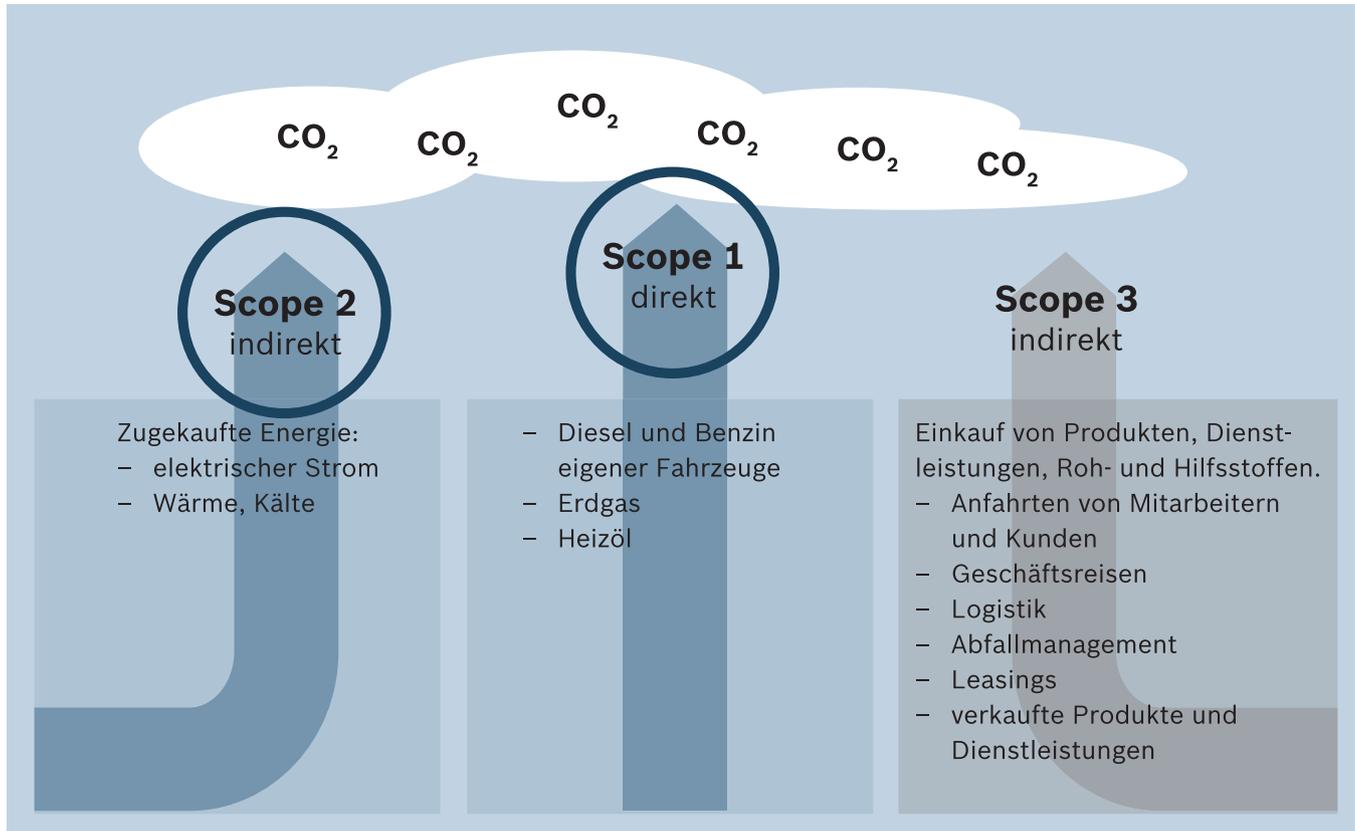


Abb. 2: Scope 1 und 2 beschreiben den Rahmen der CO₂-Bilanzierung bei Bosch

Das Greenhouse Gas Protocol liefert die Berechnungsgrundlage

Die Regelungen zum Klimaschutz und zum Treibhausgas-/GHG-Management von Bosch basieren auf Leitfäden der Greenhouse-Gas-Protocol-Initiative des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), in dem Bosch Mitglied ist, und des World Resource Instituts (WRI). Klimaschutz bei Bosch und das damit verbundene CO₂-Management beziehen sich auf Scope 1 und Scope 2 des GHG-Protokolls für Treibhausgas-/GHG-Emissionen.

Wesentliche Grundlage für die Berechnung der CO₂-Emissionen sind damit die Verbrennung von Gas oder Öl und eingekaufter Strom. Für die eingekaufte Kilowattstunde Strom wird über länderspezifische CO₂-Faktoren eine CO₂-Emission berechnet, die in den stromerzeugenden Kraftwerken entsteht, aber durch den Bedarf in den Werken verursacht wurde und deshalb den Werken zugerechnet wird. Der Energieverbrauch bei der Herstellung von Vorprodukten oder bei der Nutzung der Produkte (Scope 3) geht nicht in die Berechnung ein.

1.2 Zielableitung, Potenzialfindung und Monitoring im internationalen Konzern – der Kern des GoGreen-Projekts



Abb. 3: Vorgehensweise im GoGreen-Projekt

Bei der Anwendung einer Kennzahl wie CO₂rel, bei der länderspezifische Kennzahlen großen Einfluss haben, muss auf Basis von langfristigen Prognosen ermittelt werden, wie die Kennzahl für das Gesamt-Unternehmen auf die Entwicklung in den unterschiedlichen Regionen der Erde reagiert. Schließlich wird für die Verwendung einer Kilowattstunde Strom in China (788 g/kWh) fast doppelt so viel CO₂ erzeugt wie in Deutschland (404 g/kWh) (Daten aus dem GHG-Protokoll). Erst mit einer Szenario-Rechnung erhält man die tatsächliche Zielstrecke, die nötig ist, um das Konzern-Ziel zu erreichen.

Um herauszufinden, wo Verbesserungen möglich sind, müssen die Potenziale der Werke betrachtet werden. Dafür wurde bei Rexroth im GoGreen-Projekt eine standardisierte Vorgehensweise entwickelt und angewendet. Jedes Werk erhält auf Basis dieser Analyse ein individuelles Ziel, welches seine Potenziale berücksichtigt.

Nach Umsetzung der Maßnahmen werden mögliche Ziellücken erneut berechnet und durch Maßnahmen zur Erzeugung regenerativer Energie geschlossen.

Die ganzheitliche Potenzialanalyse von Werken

Was wird bei der Potenzialanalyse in den Werken betrachtet?

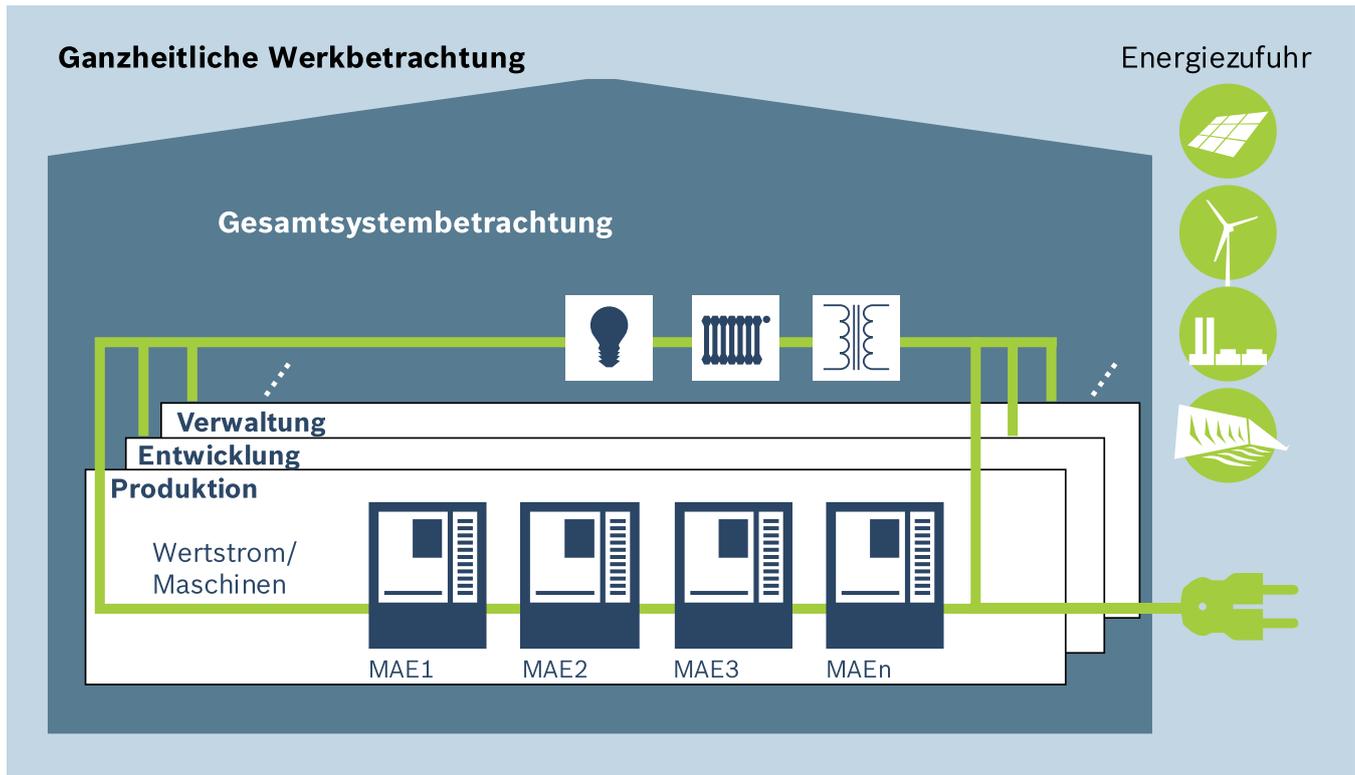


Abb. 4: Ganzheitliche Werkbetrachtung

Da in einem Fertigungswerk viele verschiedene Energieverbraucher vorhanden sind, soll mit einer ganzheitlichen Analyse der größte Teil davon erfasst werden. Anders als bei „üblichen“ Energieberatungen geht es eben nicht nur um klassische Fragen der Infrastruktur wie Gebäude, Heizung und Klima, sondern vor allem auch um die Produktionsprozesse. Dabei werden sowohl die einzelnen energieverbrauchenden Komponenten als auch die gesamte Fertigungslinie untersucht. Dies schließt die Interaktion zwischen

Maschinen oder auch Gebäuden und der sonstigen Infrastruktur ein. Mit der ganzheitlichen Analyse soll eine Übersicht erreicht werden, die es erlaubt, sich auf die richtigen Potenziale zu konzentrieren. Dies liefert dann die notwendigen Kenntnisse, auf deren Basis Projekte gestartet werden können.

Der folgende „Prozess“ zeigt diese Herangehensweise von der einzelnen Komponente bis zur Betrachtung des ganzen Werkes:



Abb. 5: Elemente des Produktionsprozesses, die analysiert werden

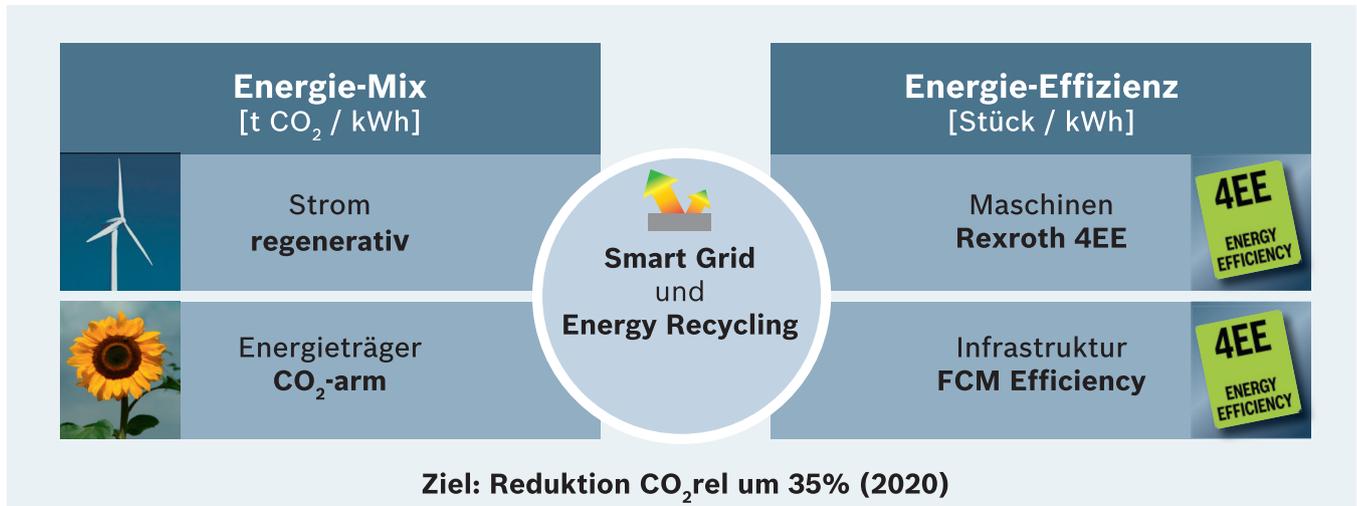


Abb. 6: Hebel zur Reduzierung der CO₂-Emissionen

Ziel des Bosch-Konzerns ist es, die CO₂-Emissionen um 35% zu verringern. Die beiden Hebel hierzu sind der Energie-Mix und die Energie-Effizienz. Mit der richtigen Wahl des Energie-Mixes vermindert man CO₂, welches durch den Energieträger ins Unternehmen gebracht wird, z. B. durch den Ersatz von Heizöl durch Gas oder durch die Umstellung von Strom auf Gas. Für Gas wird ein CO₂-Faktor von 202 g/kWh angenommen. Der Faktor für Strom liegt in Deutschland mit 404 g/kWh fast beim Doppelten! Die Wahl des Energieträgers kann also einen großen Einfluss auf die Menge der CO₂-Emissionen haben. In der Praxis sind diese Optionen durchaus vorhanden, man kann z. B. die Härterei eines Werkes mit Strom oder mit Gas betreiben. Kaufmännisch betrachtet ist die Gas-Variante heute

oftmals sogar wirtschaftlicher als der Betrieb mit Strom. Der zweite große Hebel liegt in der Energieeffizienz von Maschinen, Anlagen und der Infrastruktur. Wie viel Energie wird benötigt, um ein Teil herzustellen? Wie viel Energie wird benötigt, um einen Quadratmeter Hallenfläche zu beheizen? Mit solchen Größen wird die Energieeffizienz einer Fertigung ausgedrückt und kann sowohl auf die direkte Produktion (kWh/Teil) als auch auf die zugehörige Infrastruktur angewendet werden. Rexroth 4EE ist vor allem auf die Fertigung fokussiert. Mit der Maxime „Weniger Energie bei höherer Produktivität“ wird diese Zielrichtung klar zum Ausdruck gebracht. Sparsamere Maschinen bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktivität, das ist die Domäne von Rexroth.

Was ist das Ergebnis einer ganzheitlichen Werkanalyse?

Das Ergebnis einer ganzheitlichen Werkanalyse kann mit einer so genannten „Brücke“ dargestellt werden (siehe Abb. 7).

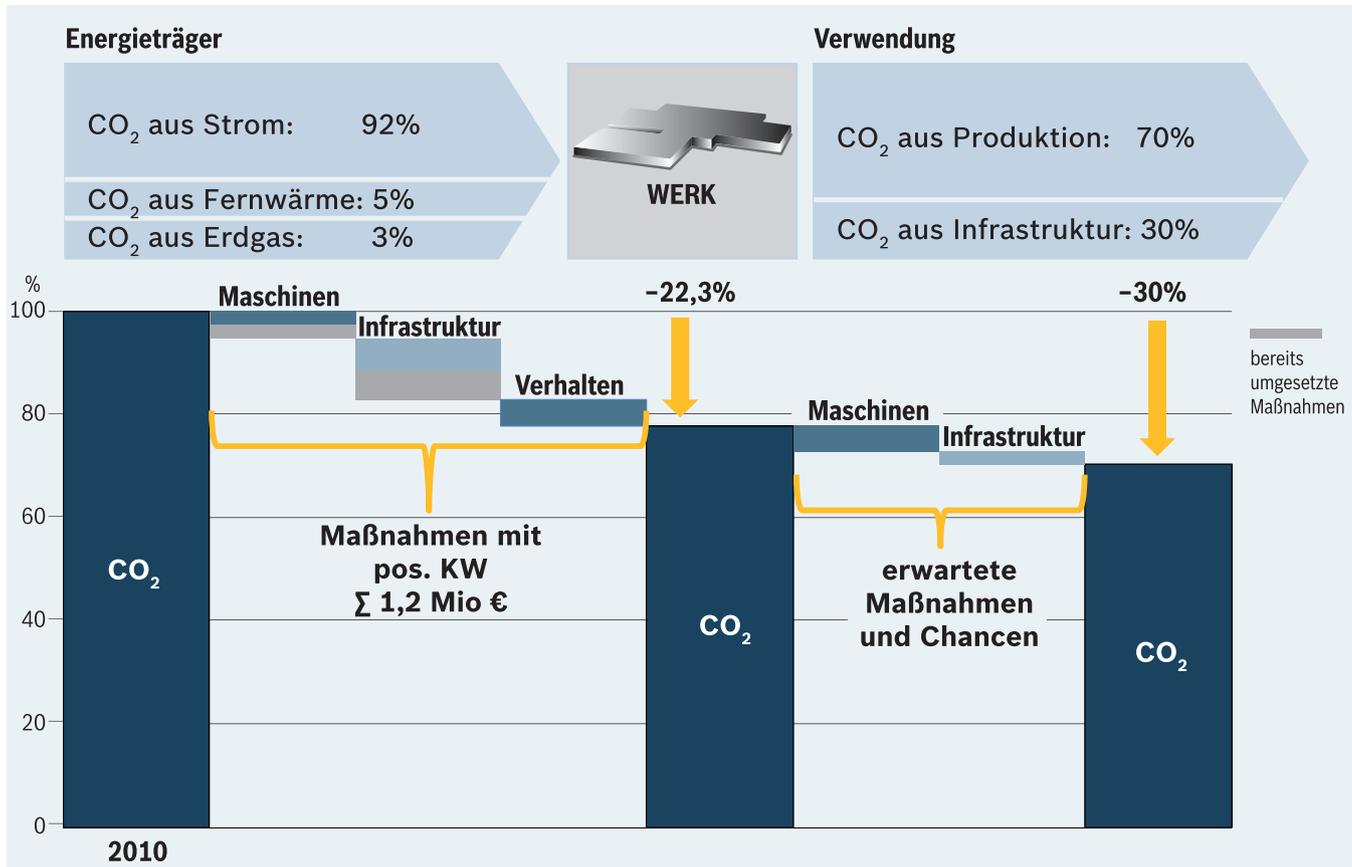


Abb. 7: Beispiel einer ganzheitlichen Werkanalyse

Der Werkleiter erhält mit einem Blick die Information, um wie viele Prozentpunkte er die CO₂-Emissionen mit wirtschaftlichen Maßnahmen senken kann (mittlerer Balken) und welche Mittel er dafür benötigt. Diese Maßnahmen sind im Diagramm als drei Bereiche Maschinen, Infrastruktur und (Mitarbeiter-)Verhalten dargestellt. Er sieht zusätzlich noch die Chancen, die sich durch weitere Ideen ergeben können, deren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit aber noch nicht ausreichend untersucht werden konnte. Hinter den Balken „verbergen“ sich konkrete Maßnahmen, die im nächsten Kapitel genauer erläutert werden.

Sind die wirtschaftlichen Potenziale eines Werkes bekannt, kann mit diesem Wissen dann ein Plan entstehen, die Potenziale Schritt für Schritt in den darauf folgenden Jahren zu erschließen. Damit werden die Verbesserung und der notwendige materielle Aufwand planbar.

Aus Konzern-Sicht ergibt sich damit der Vorteil, dass Ziele nicht mit der „Gießkanne“ für alle gleich verteilt werden, sondern alle Werke den gleichen „Anspannungsgrad“ erhalten, d. h., alle Werke müssen sich gleich anstrengen, um ihre Ziele zu erreichen. Mit der Analyse, der Bewertung und der Festlegung, welche Maßnahmen umgesetzt werden sollen, ist der erste Schritt, nämlich die Planung eines typischen PDCA-Zyklus (Plan - Do - Check - Act), gestartet. Den nächsten Schritt bildet die Umsetzung der Maßnahmen (Do).

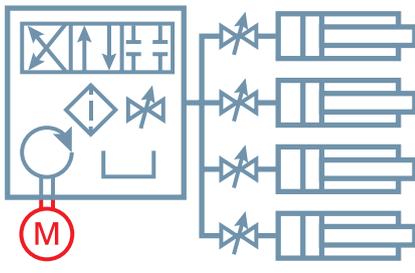
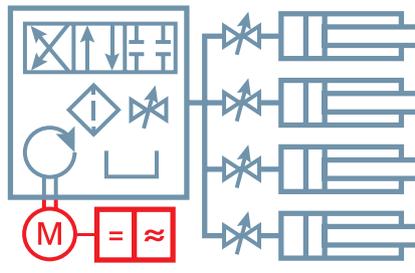
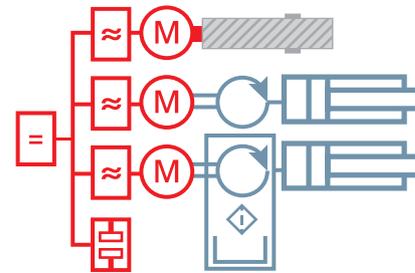


Abb. 8: Elemente des PDCA-Zyklus

6.5 Vollintegrierte Hydraulik – Energieeffizienz auf Antriebsebene

Derzeit zeichnen sich einige grundsätzliche Technologietrends ab, von denen insbesondere die Elektrifizierung und Elektronifizierung der Hydraulik für Bosch Rexroth eine zentrale Rolle einnimmt. Rexroth 4EE-Komponenten mit vollintegrierter Hydraulik gewinnen dadurch weiter an Bedeutung. Die traditionelle Fluidtechnologie regelte Durchfluss und Druck und verzweigte die Leistung mit einer Drosselsteuerung über Ventiltechnik. Eine Konstantpumpe erzeugte stets den maximalen Druck und Förderstrom. Alles was der Prozess davon nicht benötigte, wurde über Ventile abgeleitet und in unproduktive Wärme umgewandelt. Bei Anwendungen, bei denen der Prozess stets die Eckleistung abrufen, ist diese Systemauslegung durchaus energieeffizient. In zahlreichen Anwendungen aber gibt es Phasen mit Teillast oder sogar Null-Last. In diesen Fällen ist traditionelle Hydraulik weniger energieeffizient. Das ändert sich grundsätzlich mit dem Erfolg der drehzahlvariablen Pumpenantriebe Sytronix. Sytronix steht für „Smart interplay of Hydraulics and Electronics“, also das intelligente Zusammenspiel von Hydraulik und Elektronik. In konventionellen Hydrauliksystemen mit Konstantantrieb erzeugt die Hydraulikpumpe mit hoher Drehzahl kontinuierlich den maximalen Förderstrom. Wenn der Prozess diese Leistung nicht abfordert, wird

die Energie über Drosselventile „vernichtet“ und in Wärme umgewandelt. Die von Rexroth entwickelten, patentierten Pumpenantriebe Sytronix sind dagegen drehzahlvariabel und erzeugen den Volumenstrom für hydraulische Aktoren bedarfsgerecht. Sie regeln Druck und Förderstrom elektrisch und passen sie dem aktuellen Bedarf an. Bei Teillast senken sie die Drehzahl und damit den Energieverbrauch herab. Das verbessert die Energieeffizienz je nach Zykluscharakteristik um bis zu 80 Prozent. Die Leistungsverzweigung erfolgt aber nach wie vor hydraulisch über Ventile. Jetzt setzen sich immer schneller vollintegrierte Lösungen von Rexroth durch, bei denen sowohl die Leistungsregelung als auch die Leistungsverzweigung rein elektrisch erfolgen. Die Grundidee: An Stelle eines Zentralaggregats, das alle hydraulischen Verbraucher über eine Drosselsteuerung versorgt, treten intelligente elektrohydraulische Einzelantriebe mit einer energieeffizienten Verdrängersteuerung. Sie regeln aus der Drehzahl des Motors und dem Schwenkwinkel der Pumpe heraus Druck und Förderstrom weitgehend ohne Ventile. Dadurch entsteht ein stufenlos verstellbares hydraulisches Getriebe. Das nutzen Pressenhersteller bereits für den Oberkolbenantrieb. In Tab. 8 sind die oben beschriebenen Lösungen gegenüber gestellt.

Traditionell	Elektrohydraulik – Stufe 1	vollintegrierte Lösung
 <p>■ Hydraulik ■ Elektrik</p>	 <p>■ Hydraulik ■ Elektrik</p>	 <p>■ Hydraulik ■ Elektrik ■ Mechanik</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▶ hydraulische Regelung von Durchfluss und Druck ▶ elektrischer Konstantantrieb (mit Netzfrequenz) ▶ hydraulische Leistungsverzweigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ elektrische Regelung von Durchfluss und Druck ▶ bedarfsorientierte Leistungserzeugung ▶ hydraulische Leistungsverzweigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ elektrische Regelung von Durchfluss, Druck und Lage ▶ bedarfsorientierte Leistungserzeugung ▶ elektrische Leistungsverzweigung ▶ DC-Zwischenkreis
<ul style="list-style-type: none"> ▶ niedrige Energieeffizienz ▶ hoher Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ mittlere Energieeffizienz ▶ reduzierter Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ hohe Energieeffizienz ▶ optimierter Energieverbrauch

Tab. 8: Elektrifizierung der Hydraulik

Für lineare Bewegungen hat Bosch Rexroth einen Baukasten autarker Achsen entwickelt. Identische Servoantriebe treiben sowohl elektromechanische als auch hydraulische Achsen an. Diese servohydraulischen Achsen haben einen eigenen, dezentralen Fluidkreislauf und sie benötigen kein zentrales Hydraulikaggregat. So können beispielsweise Maschinenhersteller je nach Leistungsstufe innerhalb einer Maschinenfamilie frei zwischen den Antriebstechnologien wählen – bei nahezu identischer mechanischer Konstruktion, Software und Energieeffizienz.

Die Umstellung von einem Zentralaggregat auf mehrere elektrohydraulische Einzelachsen hat weitere Einsparungen zur Folge: Die benötigte Hydraulikölmenge sinkt von vormals mehr als zehntausend Liter auf wenige hundert Liter und ein energieintensives Kühlaggregat kann komplett entfallen. Das ist ein wichtiger Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz und niedrigen Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership).

6.6 Unterschiede zwischen traditioneller Hydraulik und Sytronix-Lösungen

Traditionelle Hydraulik

In der traditionellen Hydraulik wird die Leistung bzw. der Druck und Volumenstrom mechanisch oder elektrohydraulisch in der Pumpe geregelt. Abb. 50 zeigt dieses Konzept in einer vereinfachten Prinzipdarstellung.

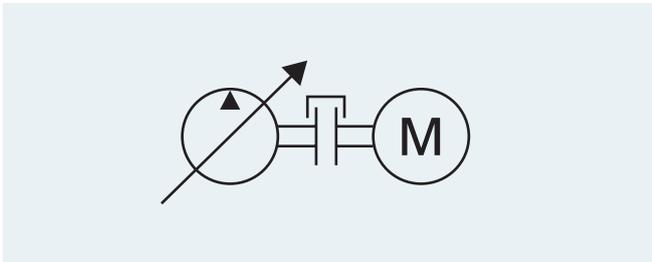


Abb. 50: Prinzip der traditionellen Hydraulik

Hydraulische Pumpen können mit verschiedenen Reglern, wie z. B. Druckreglern oder Druck-Förderstromreglern, ausgerüstet werden. In Abb. 51 ist dargestellt, wie eine Verstellpumpe mit verschiedenen Reglern ausgerüstet werden kann.

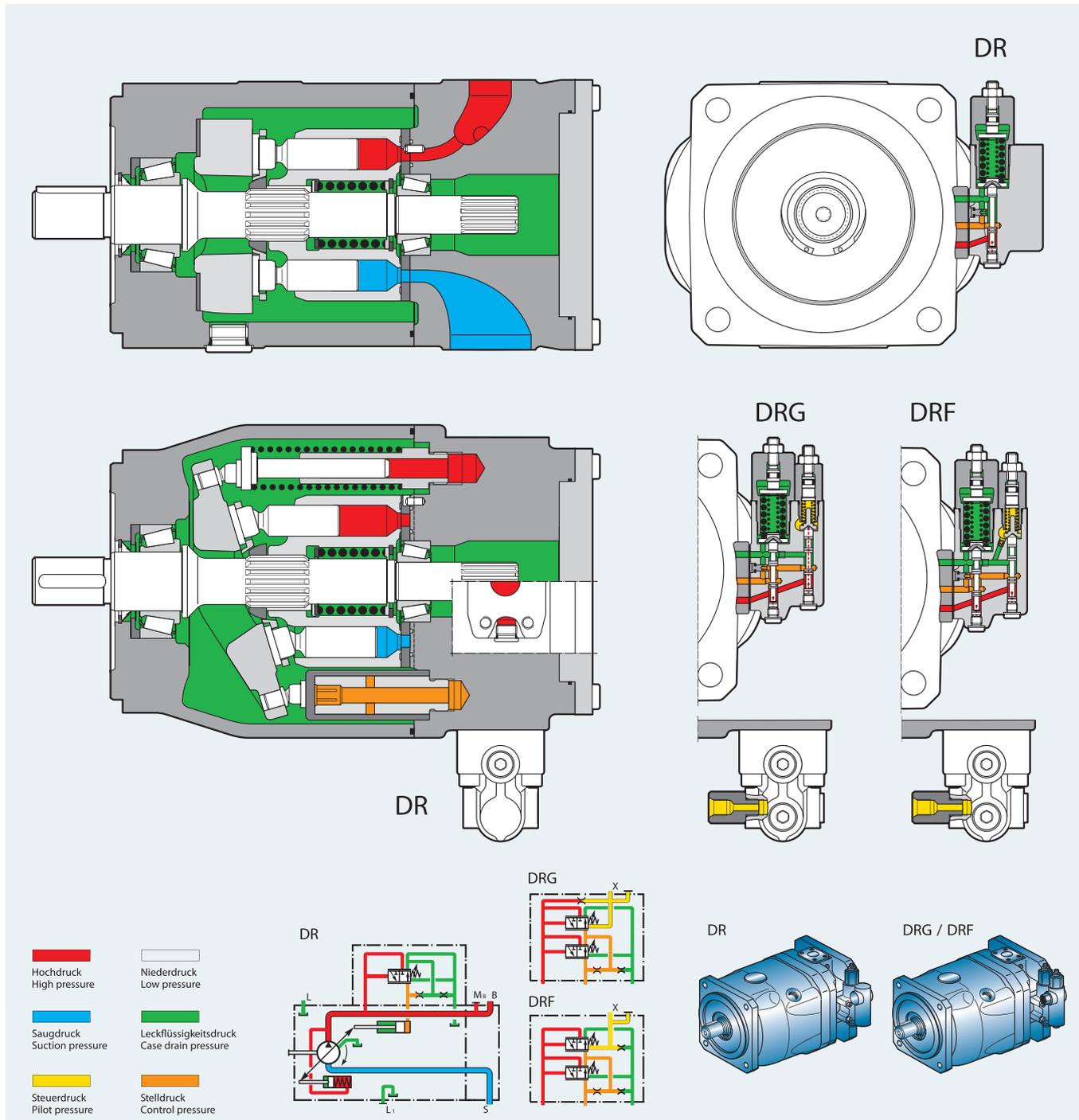


Abb. 51: Kombination der Verstellpumpe NG 100 mit verschiedenen Reglern

► **Druckregler (DR)**

Der Druckregler begrenzt den maximalen Druck am Pumpenausgang innerhalb des Regelbereiches der Verstellpumpe. Die Verstellpumpe fordert nur so viel Druckflüssigkeit, wie von den Verbrauchern benötigt wird. Übersteigt der Betriebsdruck den am Druckventil eingestellten Drucksollwert, regelt die Pumpe in Richtung kleineres Verdrängungsvolumen und die Regelabweichung wird abgebaut.

► **Druckregler (DRG)**

Der Druckregler (DRG) ist ein ferngesteuerter Druckregler. Beim ferngesteuerten Druckregler kann der Drucksollwert über ein separat angeordnetes Druckbegrenzungsventil eingestellt werden.

► Druck-Förderstromregler (DRF/DRS)

Zusätzlich zur Funktion des Druckreglers wird über eine einstellbare Blende (z. B. Wegeventil) ein Differenzdruck vor und nach der Blende abgenommen, der den Förderstrom der Pumpe regelt. Die Pumpe fordert die vom Verbraucher tatsächlich benötigte Druckflüssigkeitsmenge. Der Druckregler ist überlagert.

Betrachten wir weiter den Normmotor, der bei seiner netzfrequenzabhängigen Nenndrehzahl von 1500 min^{-1} betrieben wird.

In vielen Anwendungen dominiert der hydraulische Teillastanteil stark. In diesem Betriebsbereich hat ein Normmotor bei geringer Drehmomentabgabe nur einen sehr geringen Wirkungsgrad, da die Motoren auf Nennleistung im Nennarbeitspunkt konstruiert wurden. Durch die Anpassung des Schwenkwinkels der Verstellpumpe wird der Volumenstrom ins System geregelt. Die Drehmomentabgabe am Elektromotor variiert mit der Verstellung des Schwenkwinkels der Pumpe und dem entsprechend abgegebenen Druckniveau. In vielen Anwendungen läuft der E-Motor und die Verstellpumpe im Nullhub oder Teillastbetrieb zeitlich sehr lange. Als Beispiel können hier spanende Werkzeugmaschinen wie z. B. Drehmaschinen aufgeführt werden. Die Funktion der Hydraulik bei einer Drehmaschine kann häufig auf „nur den Druck im System halten“ und „interne Leckage ausgleichen“ reduziert werden. Hierbei wird die hydraulische Verstellpumpe im Nullhub und der Elektromotor ebenfalls im Teillastbetrieb betrieben. In Abb. 52 ist der Wirkungsgrad eines 18,5 kW Normmotors dargestellt.

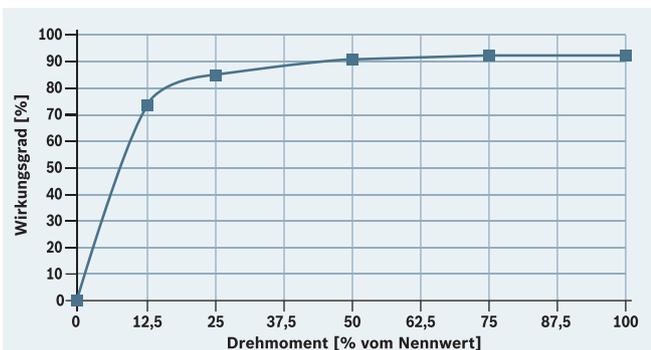


Abb. 52: Wirkungsgradkennlinie eines 18,5-kW-Normmotors

Sytronix-Lösungen



Bei Sytronix-Lösungen hingegen ist die Regelung

nicht mehr direkt in der Pumpe integriert, sondern wird von der Elektronik im Umrichter durchgeführt. Hierbei kann der Umrichter verschiedene Signale als Sollwerte bekommen. Die integrierte hydraulische Firmware, entweder als vordefinierte Parameterliste oder frei programmierbare SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) verarbeitet den Sollwert, welcher entweder fest eingestellt oder über ein Feldbussystem flexibel vorgegeben werden kann. Der aktuelle Istwert, der typischerweise mit einer Druckmessdose gemessen wird, vergleicht die Steuerung mit dem Sollwert. Als Stellgröße wird die Drehzahl des Motors und somit der Volumenstrom der Pumpe variiert. Als Sollwert kann ebenfalls die Position eines Zylinders vorgegeben werden, der dann mit dem Antrieb direkt auf die Position geregelt werden kann.

In Abb. 53 und Abb. 54 werden die Prinzipschemata der möglichen Sytronix Baukastenlösungen dargestellt. Mit hydraulischen Konstantverdrängern kann der Volumenstrom proportional über die Drehzahl verändert werden.

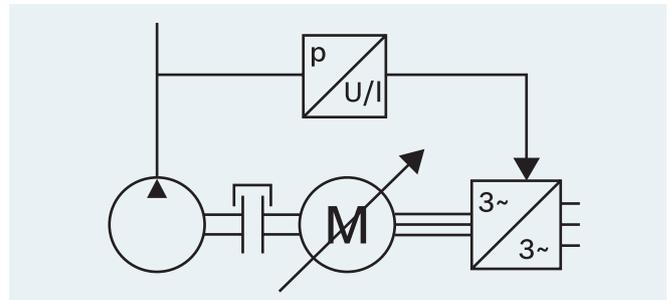


Abb. 53: Prinzipschema einer Sytronix-Lösung mit Konstantverdränger

Bei hydraulischen Verstellverdrängern wird der Volumenstrom unabhängig von der Drehzahl angepasst. Somit steht ein höherer Freiheitsgrad für eine Prozessoptimierung zur Verfügung. Diese Flexibilität wirkt sich sehr positiv auf die Energieeffizienz aus, denn hierbei kann auf integrierte Verlustmodelle der hydraulischen Verstellverdränger in den Umrichtern zurückgegriffen werden.

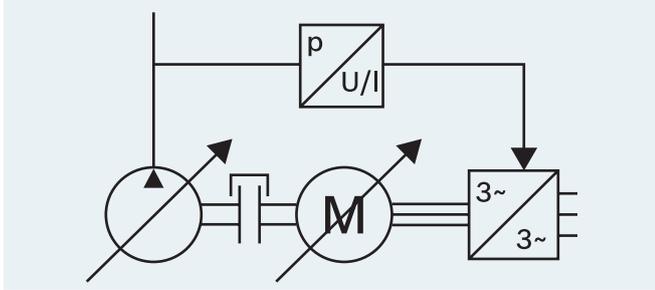


Abb. 54: Prinzipschema einer Sytronix-Lösung mit Verstellverdränger

Mittlerweile ist die Verschmelzung von Hydraulik und Elektrik so weit fortgeschritten, dass sie am Markt akzeptiert wird. Bosch Rexroth bietet diese multitechnologischen Lösungen in Serienprodukten an. Diese Systemlösungen werden in drei Hauptfunktionsgruppen unterteilt (siehe Abb. 55):

- ▶ Lösungen optimiert für Konstantdrucksysteme,
- ▶ Systeme für p/Q-Regelungen und
- ▶ Lösungen zur Positionier- und Kraftregelung.

Sytronix		
Konstantdrucksystem	p/Q	p/Q, F/x
Sets für Konstantdrucksysteme ▪ Druckregelung	Sets für Achsregelung ▪ Druckregelung und Volumenstrom-steuerung ▪ Leistungsregelung	Sets für Achsregelung ▪ Druckregelung und Volumenstrom-steuerung ▪ Positionsregelung
DRn 7020 18.5 ~ 315 kW (4MW) 	DFEn 5020/7020 15 ~ 315 kW (4MW) Optional HFC, Mehrfachpumpen Hohe Dynamik	SvP 7020 9 ~ 80kW (4MW) Position- und Kraftregelung 
FcP 5020/7020 0.4 ~ 18.5 kW (4MW) 	EPn 7020 15 ~ 250kW (4MW) Mittlere Dynamik	

Abb. 55: Sytronix-Serienprodukte von Bosch Rexroth

Die Standardanwendungen für Konstantdruckregelung im offenen hydraulischen Kreis teilen sich in zwei Produktgruppen auf: Sytronix DRn und Sytronix FcP. Sytronix FcP-Systeme bestehen aus einem Asynchronnormmotor, einem Frequenzumrichter und bevorzugt aus einer hydraulischen Zahnradpumpe. Diese eignen sich für Lösungen im kleineren Leistungsbereich für

Werkzeugmaschinenanwendungen. Die Lösungen werden als Basis für das Kleinstaggregat CytroPac genutzt.

Die Sytronix DRn-Lösungen basieren auf hydraulischen Verstellverdrängern mit mechanischem Druckregler, drehzahlvariablem Asynchronnormmotor und einem Umrichter. Diese sind als Standard im Aggregat ABPAC zu finden.

Drei Produktgruppen bringen in der Basisversion eine ablösende Druck-/Volumenstromregelung mit. Die DFEn- und EPn-Varianten basieren auf hydraulischen Verstellverdrängern, drehzahlvariablem Asynchronnormmotor und einem Umrichter. Sie unterscheiden sich durch die Wahl der Verstellverdrängertypen und des Regelalgorithmus im Softwarepaket, welches im Umrichter implementiert ist. Die dritte Produktgruppe SvP, die grundsätzlich durch einen Servosynchronmotor, Servoumrichter und einen hydraulischen Konstantverdränger gekennzeichnet ist, kann zusätzlich noch funktional für komplexe Positionieraufgaben eingesetzt werden.

6.7 Vorteile der drehzahlvariablen Pumpenantriebe Sytronix

Neben der Energieeinsparung ergeben sich durch den Einsatz von Sytronix-Lösungen eine Reihe weiterer Vorteile:

- ▶ **Weniger Energieverbrauch**
Energieeinsparungen bis zu 80% führen zur Senkung der Betriebskosten und zur Reduzierung des Ausstoßes des klimaschädigenden Kohlendioxids.
 - ▶ **Weniger Geräuschemission**
Durch Absenkung der mittleren Geräuschemission des Hydraulikaggregats um bis zu 20 dB (A) können gesetzliche Lärmschutzvorgaben leichter eingehalten und der Aufwand für Lärmschutzmaßnahmen reduziert werden.
 - ▶ **Weniger Aufwand für Installation und Inbetriebnahme**
Vorkonfigurierte Sytronix-Sets als Motor-Pumpen-Einheiten oder als Aggregate mit aufeinander abgestimmten Komponenten ermöglichen die gezielte Auswahl des kompletten Pumpenantriebssystems mit kurzen Installations- und Inbetriebnahmezeiten. Rexroth bietet insgesamt mehr als 100 Sets in drei verschiedenen Performance-Klassen.
 - ▶ **Weniger Kühlaufwand**
Drehzahlvariable Pumpenantriebe senken die durchschnittliche Drehzahl der Hydraulikpumpen. Hierdurch entsteht deutlich weniger Reibungswärme und der Aufwand zur Kühlung des Hydraulikaggregates verringert sich.
 - ▶ **Weniger Platzbedarf**
Der Einsatz von Sytronix-Antrieben senkt den Platzbedarf in der Maschine deutlich:
 - Kompakte Bauform des Sytronix-Systems
 - Weniger aufwendige Proportionalventiltechnik und Schaltschrank-Regelelektronik
 - Kleinere Hydraulikaggregate durch Verringerung des benötigten Hydraulikflüssigkeitsvolumens
 - Kleinere Vorrichtungen für Kühlung und Geräuschkämmung durch geringere Wärme- und Geräuschentwicklung
 - ▶ **Höhere Betriebssicherheit**
 - Optimal aufeinander abgestimmte und bewährte hydraulische und elektrische Standardbauteile
 - Condition-Monitoring durch Diagnose und Zustandsüberwachung in geregelten Antrieben
 - ▶ **Effiziente Nachrüstung**
Spezialisten von Rexroth unterstützen den Maschinenanwender über den gesamten Nachrüstprozess von der Projektierung bis zur schnellen Montage und Inbetriebnahme vor Ort.
 - ▶ **Einhaltung gesetzlicher Vorgaben**
Sytronix drehzahlvariable Pumpenantriebe helfen, gesetzliche Vorgaben zum Lärmschutz in Produktionshallen (z. B. Richtlinie 2003/10/EG) und zum Effizienzniveau von Elektromotoren (z. B. Verordnung (EG) Nr. 640/2009) einzuhalten.
 - ▶ **Vordefinierte Funktionspakete**
Die vordefinierten Systemlösungen im Sytronix-Haus sind bereits bei der Auslieferung mit Funktionspaketen ausgestattet. Die Funktionspakete sind hauptsächlich abhängig vom Umrichtertyp. Eine Erweiterung der Funktionspakete ist möglich.
- Die Hydraulikaggregate der Baureihen ABPAC und CytroPac von Rexroth vereinen bereits diese Vorteile durch den Einsatz von Sytronix-Komponenten. Zusätzlich wurde die Hydraulik für einen offenen Datenaustausch mittels Umrichtertechnik und Bussystemen konzipiert. Mit dezentraler Intelligenz und optionalen Sensorpaketen erfassen die Aggregate kontinuierlich alle Betriebszustände und kommunizieren über offene Schnittstellen mit übergeordneten Steuerungsebenen oder dazu berechtigten Smartphones und Tablet-PCs. Dadurch ist diese Systemlösung Industrie 4.0-fähig.

6.8 Unterstützung bei der Systemfindung

 Um als Kunde zu einem innovativen Produkt zu gelangen, müssen zuerst die Anforderungen an die Systemlösung vorliegen. Um diese zu erfassen, können sie mit Hilfe von Checklisten und Softwareanwendungen gesammelt und ausgewertet werden. Bosch Rexroth bietet dazu einen speziellen Fragebogen für energieeffiziente Hydraulikaggregate, die Software „SytronixSize“ und

das Simulationstool „Simster S“ an, die vom Vertrieb zur Beratung genutzt werden.

In Abb. 56 sind vier verschiedene Möglichkeiten dargestellt, wie die hydraulische Leistung, bestehend aus Druck und Volumenstrom, in einem System für eine Drosselregelung oder eine Regelung mit Verstellpumpe bereitgestellt und verteilt werden kann.

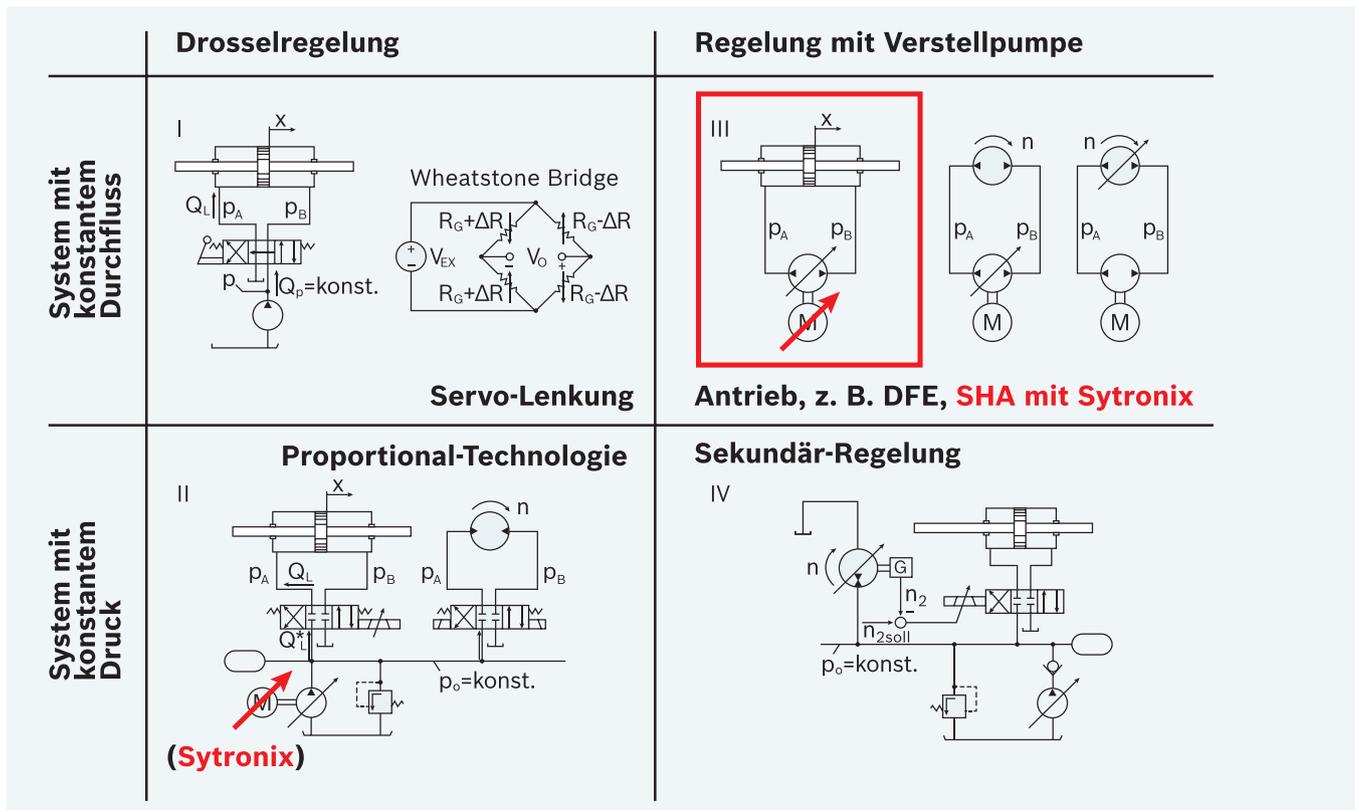


Abb. 56: Möglichkeiten zur Bereitstellung der hydraulischen Leistung

Für zwei der vier dargestellten Systeme können Sytronix-Lösungen eingesetzt werden. Mit dieser Kenntnis erfolgt nun die Abwägung der Systeme unter Berücksichtigung von diversen Kriterien, wie z. B. der vier Hebel von Rexroth 4EE.

Fragebogen für energieeffiziente Hydraulikaggregate oder Systemlösungen

In diesem Fragebogen werden neben dem Lastprofil noch eine Reihe weiterer Randbedingungen erfasst, um eine drehzahlvariable Antriebslösung für ein Retrofit

oder eine Neuanwendung optimal auf die kundenseitige Anwendung anzupassen (siehe Abb. 57). Auf der hydraulischen Seite sind die Gegebenheiten wie z. B. Fluid, Hydraulikschema, Kühlbedarf oder das Vorhandensein eines Speichers wichtige Faktoren, welche die Zusammenstellung eines Sytronix-Systems beeinflussen können. Auch elektrisch sind Parameter wie beispielsweise Netzspannung und Netzform, die verwendete übergeordnete Steuerung, Umgebungstemperaturen und die für das Gesamtsystem geforderte Performance wichtige Grundlagen für eine zielgerichtete Konfiguration der Sytronix-Lösung.

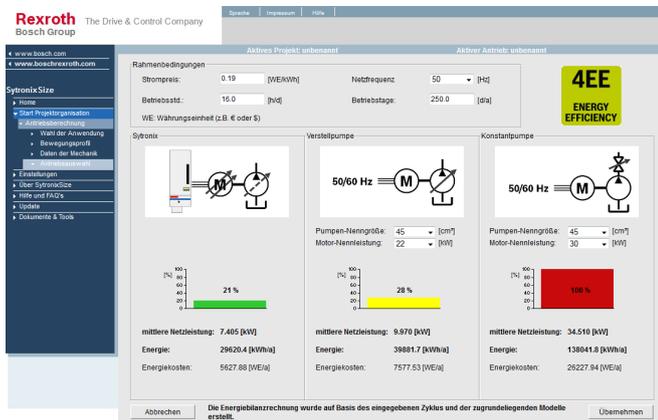


Abb. 59: Energiebilanzrechnung in „SytronixSize“

Simulation der ausgewählten Komponenten

Das Systemverhalten der gewählten Komponenten kann mit der Software „Simster S“ von Bosch Rexroth simuliert werden (siehe Abb. 60). „Simster S“ ist eine leistungsfähige Multidomain-Simulationsplattform zur Modellierung und Optimierung geregelter Antriebssysteme der Maschine. Weiter stehen generische Modellbibliotheken aller Domänen (Hydraulik, Mechanik, Regelungstechnik u. v. m.) zur Verfügung. Zur Simulation von Antriebssystemen mit Sytronix können entweder die Sytronix-Basismodelle oder selbst erstellbare Systemmodelle aus Hydraulikpumpe und Elektroantrieb genutzt werden.

Zusätzlich lassen integrierte Schnittstellen eine Co-Simulation, z. B. in OpenCore, Matlab/Simulink®, TCP/IP, C/C++ zu.

Das Tool ist intuitiv handhabbar und lässt sich schnell erlernen. Es kann kostenlos von unserem Online-Portal heruntergeladen werden.

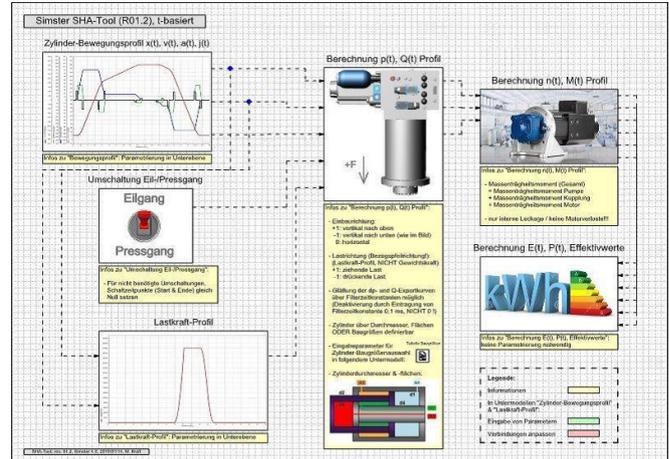


Abb. 60: Simulation des Systemverhaltens in der Software „Simster S“

Die Systemanalyse mit der Software „Simster S“ erlaubt eine grafische Darstellung der Energieverbräuche der einzelnen Komponenten, welche im System zuvor mit SytronixSize projiziert worden sind (siehe Abb. 61). Aufgrund der Simulation des Gesamtsystems können technische Grenzen identifiziert und ggf. in einem erneuten Auslegungsschritt optimiert werden.

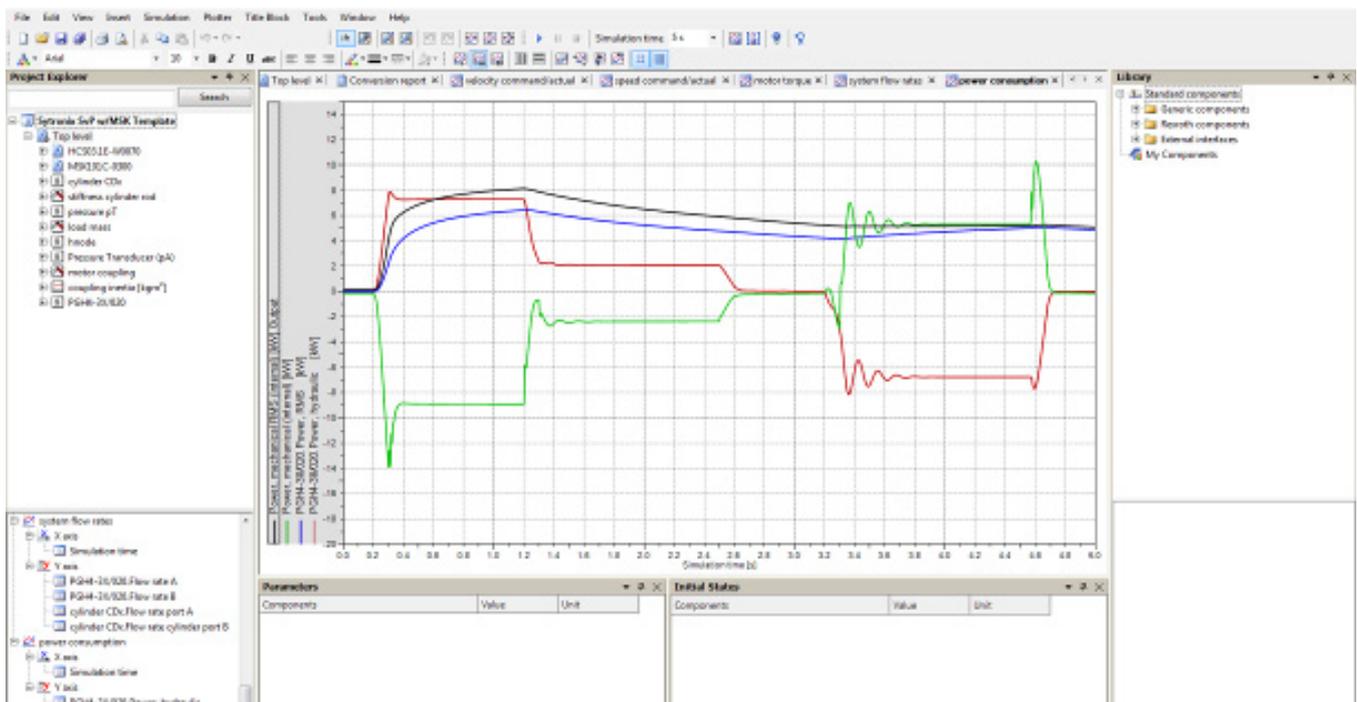


Abb. 61: Darstellung der Ergebnisse in der Software „Simster“

6.9 Innovationen bei der Sytronix-Produktgruppe

Die Produktgruppe Sytronix umfasst Produkte mit innovativen Funktionen, die bereits in vielfältigen Kundenlösungen umgesetzt wurden (siehe Tab. 9).

Weitere Innovationen wie elektronische Typenschilder, Smart Service-Apps und viele andere mehr sind in Planung.

Innovation	Umsetzung	Vorteile
Innovative Motortechnologie	Servosynchronmotor mit Pumpendirektanbaumöglichkeit	kompakt
		reduziert Kosten
		dynamische Leistung
	Asynchronmotor ohne externen Lüfter	kompaktes Design
		reduziert Kosten
Innovative Pumpentechnologie	Doppelpumpe (PGH)	energiesparend
		kleinere Motorgröße
		reduziert Kosten
	2-Punkt-Pumpe (A10/A4)	energiesparend
		kleinere Motorgröße
		reduziert Kosten
Energiemanagement und Stromversorgung	Optimierung des Volumenstroms der Pumpe mit Doppelpumpe und hydraulischem Getriebe	höhere Dynamik (dQ/dt)
		energiesparend
		kleinere Motor- und Antriebsgröße
		reduziert Kosten
	Intelligente Stromversorgung mit kapazitivem oder kinetischem Speicher	Energieaustausch
		Energiespeicher oder -rückgewinnung
		reduziert Leistungsspitzen
		Cos $\varphi = 1$
Verbesserte Steuerungsfunktionalitäten	Optimierte Regelungsalgorithmen	höhere Dynamik ohne Überschwingen
		robuste Regelung
		einfache Konfiguration
	Aktive Nutzung der Verstellbarkeit der Hydraulikpumpe	geringere installierte Leistung
		kleinerer Motor
		höhere Dynamik für Sytronix FcP
	Positions-/Kraftregelung für Zylinder	höhere Dynamik
		reduziert Kosten
		antriebsbasierte Lösung für das Subsystem
	Schwingungsdämpfung	höhere Dynamik
		höhere Genauigkeit
	Überwachungs- und Schutzfunktionen	Überwachung des Hydraulikaggregats (HPU)
SYTRONIX als Sensor Gateway		
Netzwerkfähigkeit		
Energieüberwachung		optimierte Leistungsaufnahme
		Energieregung
Zustandsüberwachung		Fehlererkennung
		vorbeugende Instandhaltung
		einfache Diagnose
Integrierte Schutzfunktionen		Komponentenschutz für die Hydraulik
		leichte Bedienbarkeit

Innovation	Umsetzung	Vorteile
Kommunikation – Maschinenintegration	offene Schnittstellen (SYTRONIX-Template)	Open Source für zusätzliche Anwendungen
		Sicherung des Know-hows
		Programmierung nach IEC 61131
	Multi-Ethernet-Schnittstelle	offen für die Integration von Fremdanwendungen
		Standard-Kommunikationshardware
		Software-Lösungen
	Master/Slave-Subsystem	Modulares System Design
		Plug & Play
		intelligentes Subsystem mit SercosIII
	SPS-Bausteine für SPS-Fremdanwendungen	benutzerfreundlich bei SPS-Fremdanwendungen
		reduzierter Konstruktionsaufwand
	Inbetriebnahme- und Wartungsfunktionen	IndraWorks SYTRONIX-Wizzard
Produktdatenbank verfügbar		
Menü für schnelle Konfiguration		kürzere Inbetriebnahme am PC
		einfache Diagnose
		geringe Kosten
Embedded Webserver		keine Installation erforderlich
		wartungsfreundlich (auf den Anwendungsfall ausgerichtetes elektronisches Typenschild)
SPS-Bausteine für SPS-Fremdanwendungen		benutzerfreundlich bei SPS-Fremdanwendungen
		reduzierter Konstruktionsaufwand

Tab.9: Übersicht über bereits umgesetzte Sytronix-Funktionen

6.10 Verfügbarkeit von Sytronix in Systemlösungen



Produktprogramm Sytronix

Sytronix		
Konstantdrucksystem	p/Q	p/Q, F/x
Sets für Konstantdrucksysteme <ul style="list-style-type: none"> ▪ Druckregelung 	Sets für Achsregelung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Druckregelung und Volumenstrom-steuerung ▪ Leistungsregelung 	Sets für Achsregelung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Druckregelung und Volumenstrom-steuerung ▪ Positionsregelung
DRn 7020 18.5 ~ 315 kW (4MW) 	DFE n 5020/7020 15 ~ 315 kW (4MW) Optional HFC, Mehrfachpumpen Hohe Dynamik 	SvP 7020 9 ~ 80kW (4MW) Position- und Kraftregelung 
FcP 5020/7020 0.4 ~ 18.5 kW (4MW) 	EPn 7020 15 ~ 250kW (4MW) Mittlere Dynamik 	

Abb. 62: Sytronix-Portfolio

Das Sytronix-Portfolio ist fein skaliert. Funktionsorientierte, vorkonfigurierte und individuelle Sets aus Umrichter, Motor und Pumpen samt Zubehörendien als Basisprogramm. Die verwendeten Einzelkomponenten sind Teil des Standardproduktprogramms von Bosch Rexroth. Die Haupteinsatzgebiete von Sytronix lassen sich aus Sicht der Hydraulik mittels der unterschiedlichen Softwarefunktionalitäten darstellen. Diese Lösungen sind fokussiert auf Konstantdrucksysteme, p/Q-Regelungen und Achsregelungen. Die hydraulische Antriebseinheit in einem Hydraulikaggregat erfüllt entweder die Aufgabe, ein Konstantdrucksystem bereitzustellen oder den Volumenstrom ablösend zum Druck zu regeln. Diese Aufgabe kann mit Sytronix-Lösungen unterstützt werden. Sytronix-Antriebe mit der Softwarefunktion „Achsregelung“ kommen bei servohydraulischen Kompaktachsen zum Einsatz.

Intelligentes Standardaggregat ABPAC: konfigurierbar, vernetzbar, energieeffizient

Als modular konzipierte Baureihe bestehen die ABPAC-Hydraulik-Aggregate aus standardisierten Baugruppen. Die neue Hydraulikaggregate-Baureihe ABPAC von Rexroth steht ganz im Zeichen der Elektrifizierung und Industrie 4.0. Alle Aggregate dieser Baureihe sind auf den Einsatz drehzahlvariabler Pumpenantriebe für Konstantdrucksysteme beispielsweise mit FcP- oder DRn-Lösungen ausgelegt. Sie senken die Drehzahl im Teillastbetrieb bedarfsgerecht ab und verringern den Energiebedarf der Hydraulik um bis zu 80%. Darüber hinaus können auch Antriebe aus der Sytronix SvP-Familie eingesetzt werden, bei denen die besonderen Anforderungen der Fluidtechnik bereits in die Software der intelligenten Antriebe integriert sind. Die Inbetriebnahme- und Diagnosetools hierfür sind die gleichen, die auch für elektrische Achsen von Rexroth verwendet werden.

Über offene Schnittstellen zur Maschinensteuerung und in die IT-Welt fügen sich die APBAC-Aggregate zukunftsicher in horizontal und vertikal vernetzte Produktionsumgebungen ein. Ein integriertes, universell nutzbares Sensorpaket erfasst kontinuierlich alle relevanten Systemzustände des Aggregates:

- ▶ Verschmutzungsgrad der Filter
- ▶ Ölqualität
- ▶ Sensoren für Arbeits-, Saug- und Speicherdruck
- ▶ Ölniveau
- ▶ verschiedene Temperaturen



Abb. 63: ABPAC-Hydraulikaggregat der neuen Generation – intelligente, vernetzte und energieeffiziente Hydraulik

Die Sensordaten, Systemgrößen und die daraus abgeleiteten Zustandsmeldungen stellen die ABPAC-Aggregate auf standardisierten Schnittstellen zur Verfügung. Diese Meldungen liest der Anwender entweder per Ethernet-Bus über die Maschinensteuerung aus oder über einen integrierten Web-Browser drahtlos von einem Smartphone oder einem Tablet-PC.

Mit seiner neuen Hydraulikaggregate-Baureihe ABPAC bietet Bosch Rexroth flexible und energieeffiziente Druckversorgungseinheiten, die für stationäre Maschinen wie etwa spanende Werkzeugmaschinen,

Holzverarbeitung oder Pressen und Kunststoffmaschinen ideal geeignet sind. Um Konstruktions- und Lieferzeiten zu verkürzen, lag ein großes Augenmerk auf standardisierten Komponenten und Prozessen.

- ▶ Kurze Lieferzeiten, schneller am Start
- ▶ Cleveres Condition Monitoring mit Open Core Interface
- ▶ Mobil zugreifen, intuitiv steuern, sparsam antreiben
- ▶ Individuell: für jede Anwendung den passenden Antrieb
- ▶ Energie sparen: mit drehzahlvariablen Sytronix-Antrieben
- ▶ Behältergröße: 100 bis 1.000 Liter
- ▶ Sonderfunktionen im Bereich Kühlung, Geräuschreduzierung und Effizienz

Hydraulikaggregat CytroPac

Nicht nur optisch, sondern auch technisch neu gedacht, hat Bosch Rexroth bei dem neuen Kleinaggregat bis 4 kW. Der CytroPac bietet auf engstem Raum ein Energieeffizienz- und Geräuschoptimierungspaket durch einen Sytronix-Antrieb. Durch die einsatzfertige interne Verdrahtung aller Sensoren, wie Druck, Temperatur, Füllstand und Verschmutzung entfallen deutliche Kosten. Auf den Aspekt der Industrie 4.0-Fähigkeit wurde ebenfalls mittels einer Multi-Ethernet-Schnittstelle Wert gelegt. Zusätzlich zur EU-Richtlinie erfüllt der CytroPac den Ansatz, einfach Versorgung, Fluid und Datenschnittstelle anschließen, fertig. Effizienter geht's nicht.

Durch besondere Produktmerkmale ergeben sich folgende Vorteile

- ▶ Praktisch – Sensorik erlaubt vorbeugendes Condition-Monitoring in Echtzeit; einfachste Integration und Inbetriebnahme
- ▶ Kompakt – platzsparendes, geräuscharmes Designkonzept, ideal z. B. für Werkzeugmaschinen
- ▶ Hocheffizient – drehzahlvariabler Sytronix-Antrieb für bedarfsgerechte Leistung; neuste Heatpipe-Technologie ermöglicht eine Wasserkühlung
- ▶ Vernetzt – komplett verdrahteter und integrierter Frequenzumrichter; kein zusätzlicher Bauraum im Schaltschrank nötig
- ▶ Zukunftssicher: ausgelegt für den Einsatz in Industrie 4.0-Konzepten



Abb. 64: CytroPac mit integriertem Pumpenantrieb Sytronix FcP

Servohydraulische Achsen: intelligente Selbstversorger für kraftvolle Aufgaben

Es kommt Bewegung in den Markt für kraftvolle Antriebsaufgaben: Die einbaufertigen servohydraulischen Achsen bestehen im Wesentlichen aus elektrischen und hydraulischen Serienkomponenten. Ihr Aufbau ist weitgehend standardisiert. Mit einem eigenen, geschlossenen Fluidkreislauf benötigen sie genau wie die elektromechanischen Varianten lediglich eine Stromversorgung und keinen Anschluss an ein Hydraulikaggregat. Dazu unterstützen IndraDrive Regelgeräte mit ihrer Multi-Ethernet-Schnittstelle alle gängigen Ethernet-Protokolle wie Sercos, ProfiNet, EtherNet/IP, EtherCAT oder Powerlink.

Die Achsregelung übernimmt ein neu entwickeltes und hydraulisch optimiertes Technologiepaket Sytronix Position-Force-Control (PFC). Auch Condition-Monitoring-Funktionen von z. B. Druck, Temperatur und Wirkungsgrad sind in der Software verfügbar und somit ist ein Datenaustausch im Sinne von Industrie 4.0 möglich. Die Komplettsysteme sind für große Kräfte von bis zu 2500 kN verfügbar.

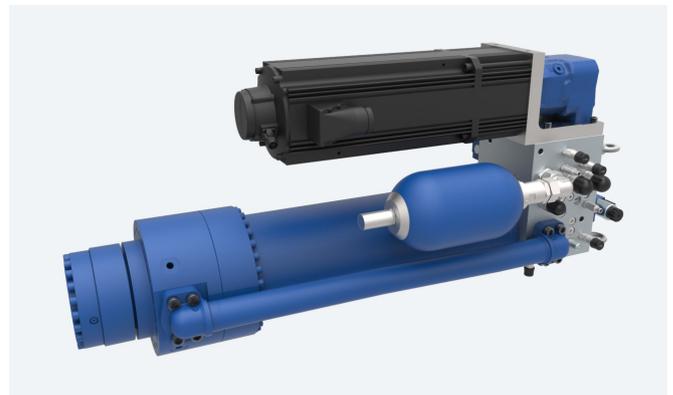
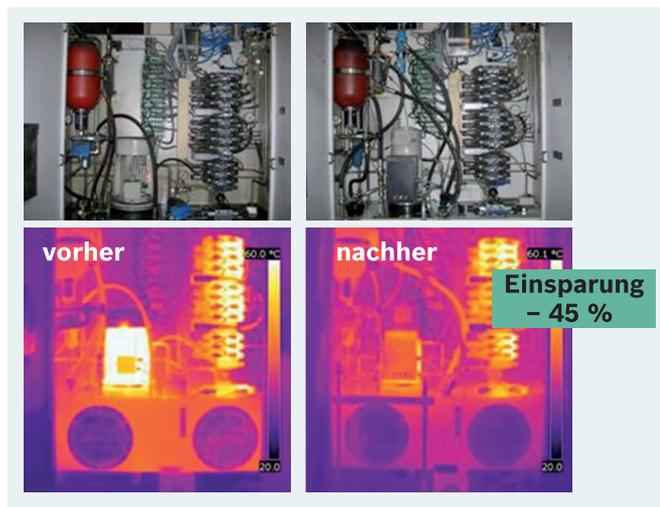


Abb. 65: Servohydraulische Achse (SHA)

6.11 Umrüstung eines Bearbeitungszentrums auf Sytronix



Im Bosch Rexroth-Werk Homburg konnte ein 2-Spindel-

Bearbeitungszentrum aus dem Jahr 2003 so umgebaut werden, dass die Energieaufnahme um 45% reduziert werden konnte. Dabei wurden die Hebel „Energy System Design“, „Efficient Components“ und „Energy on Demand“ der Rexroth 4EE-Systematik berücksichtigt. Die Materialkosten für den Umbau beliefen sich auf 5.000 EUR. Die Amortisationszeit betrug ca. 3 Jahre und 2 Monate.

Die Energieeinsparungen können durch ein Wärmebild, das vor und nach der Umrüstung aufgenommen wird, sofort sichtbar gemacht werden (siehe Abb. 66).

Abb. 66: Wärmebild des Bearbeitungszentrums im Werk Homburg

	Ursprüngliche Antriebslösung	Rexroth 4EE-Automationslösung
Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 5,5 kW Motor ▶ Regelpumpe 250 bar / 13 l/min ▶ Konstantpumpe für Filter/Kühler 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 4,0 kW Motor ▶ drehzahlvariabler Antrieb ▶ 6 ccm-Zahnradpumpe ▶ Tankleitung führt durch Filter/Kühler
Energieaufnahme	24.600 kWh/a	13.620 kWh/a
Einsparung	10.980 kWh/a 1.537 €/a*	
CO ₂ -Vermeidung**	6,7 t/a	

* Strompreis 0,14 €/KWh inkl. 3,592 ct/KWh EEG-Umlage

** Energiemix, Deutschland gemäß GEMIS Version 4.2 im Vergleichsjahr 2004: 0,613 kg CO₂/kWh

Tab. 10: Vergleich unterschiedlicher Lösungen bei einem Bearbeitungszentrum

Aufgrund der hohen Rentabilität wurden mittlerweile vier weitere Anlagen umgebaut. Weitere acht Anlagen an zwei Standorten sind in Planung.

11 Zerspanen

Autor: Dr. Andreas Emrich

In diesem Kapitel wird das Thema „Zerspanung“ betrachtet. Hierbei wird sowohl auf Aspekte eingegangen, die vorrangig, aber nicht ausschließlich durch den Maschinenhersteller zu beeinflussen sind

(Komponenten, Auslegung, etc.), als auch auf solche, die eher vom Maschinenbetreiber zu beeinflussen sind (Prozess, Technologie etc.).

11.1 Einsparpotenziale verschiedener Maschinengruppen und Beispiele aus der Praxis

Neben einigen der gängigsten und gleichzeitig energieintensivsten Maschinengruppen (Reinigungsanlagen, Lackieranlagen, Hydraulische Pressen, etc.), die in separaten Kapiteln in diesem Buch näher erläutert werden, lassen sich weitere, insbesondere in der Bosch-Gruppe aber auch drüber hinaus häufig vorkommende Maschinen den Gruppen Bearbeitungszentren, Drehmaschinen und Schleifmaschinen zuordnen. Sie bilden den Kern der Zerspanungsmaschinen. Weitere, weniger Stückzahl starke Gruppen sind z. B. die Hon-, Hobel-, Stoß- oder auch Sägemaschinen. Jede dieser Gruppen lässt sich dann nach verschiedenen Kriterien weiter untergliedern, sodass für jedes Fertigungsverfahren eine große Anzahl von einzelnen Maschinentypen benannt werden kann. Um sich an dieser Stelle nicht im Detail zu verlieren, werden im Folgenden ausgewählte Beispiele vorgestellt, anhand derer die Maßnahmen zur Energieeinsparung in den jeweiligen, erstgenannten Maschinengruppen prinzipiell erläutert werden. Viele der aufgezeigten Maßnahmen sind grundsätzlich übertragbar, auch wenn sie sich im Detail gegebenenfalls unterscheiden mögen. Dies gilt in Teilen auch für die hier nicht im Detail erläuterten Maschinengruppen der Zerspanungsmaschinen. Grundsätzlich werden für die betrachteten Maschinen im Nachfolgenden sogenannte Sankey-Diagramme gezeigt. Diese verbildlichen die Energieflüsse innerhalb

der Maschine, und zeigen, welche Anteile der zugeführten Energien für welche Komponenten bzw. Funktionen aufgewendet werden. Sie sind damit eine ähnliche Diagrammform wie die klassischen Tortendiagramme.

Zum besseren Verständnis und für die leichtere Übertragbarkeit werden die Einzelmaßnahmen den vier verschiedenen Hebeln der 4EE-Systematik zugeordnet. Dabei werden vor allem die drei Hebel „Energy on Demand“, „Efficient Components“ und „Energy Recovery“ betrachtet. Der vierte Hebel „Energy System Design“ betrachtet die Gesamtheit einer Anlage und findet vorrangig bei deren Entwicklung und Konzeption Anwendung. Informationen dazu finden Sie im Kapitel Ganzheitlicher Ansatz beim Energiemanagement. Auf eine exakte Bewertung und Darstellung der erzielbaren Einsparungen und der Wirtschaftlichkeit muss in aller Regel verzichtet werden, da diese nicht aussagefähig wäre. Wie bereits erläutert sind die erzielbaren Einsparungen sehr stark abhängig von Randbedingungen, die sich massiv in Abhängigkeit des konkreten Einsatzfalles unterscheiden. Als einige wesentliche Einflussgrößen sind hier exemplarisch zu nennen:

- ▶ Werkstück (Material, Zerspanungsvolumen, ...),
- ▶ Art der Bearbeitung (z. B. Schrupp-, Fein- oder Komplettbearbeitung),

- ▶ eingesetzte Technologien (Bohren, Tiefbohren, Fräsen, Gewinden, ...),
- ▶ eingesetzte Werkzeuge und Schneidstoffe,
- ▶ verwendete Technologieparameter,
- ▶ Nutzungszeit der Maschinen pro Jahr,
- ▶ Maschinenverfügbarkeit,
- ▶ Strompreis,
- ▶ interne oder extern durchgeführte Umbaukosten,
- ▶ interner Zinsfuß,
- ▶ etc.

Bearbeitungszentren (Bohren & Fräsen)

Werkzeugmaschinen, die in der Vergangenheit vorwiegend auf die Anwendung eines einzelnen Fertigungsverfahrens ausgerichtet waren, haben sich mittlerweile zu Bearbeitungszentren entwickelt, in denen die Komplettfertigung durch den Einsatz verschiedener Verfahren möglich ist. Die Gründe für diese Weiterentwicklung sind sehr vielfältig. So ermöglicht die Komplettbearbeitung des Werkstücks in einer Aufspannung die Umsetzung höchster Qualitätsansprüche oder reduziert den Handlings- und Transportbedarf in der Produktion erheblich. Voraussetzung hierzu war u. a. die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Computersystemen (Steuerungen und Programmiersystemen) und Werkzeugen mit hohen Standzeiten. [vgl. 10]

Innerhalb der oben vorgestellten Bosch-Top-10-Initiative wurden verschiedene Gruppen von Bearbeitungszentren untersucht. Unterschieden wurde dabei nach dem Hauptkriterium „Nass- oder Trockenbearbeitung“ und der Anzahl der Hauptbearbeitungsspindeln. Da innerhalb der Bosch-Gruppe Bearbeitungszentren einer großen Anzahl verschiedener Hersteller vorhanden waren, wurden exemplarisch Maschinen der Hersteller GROB-Werke GmbH & Co. KG, Mindelheim (siehe Abb. 96) und STAMA Maschinenfabrik GmbH, Schlierbach als repräsentativ für die näheren Untersuchungen ausgewählt.

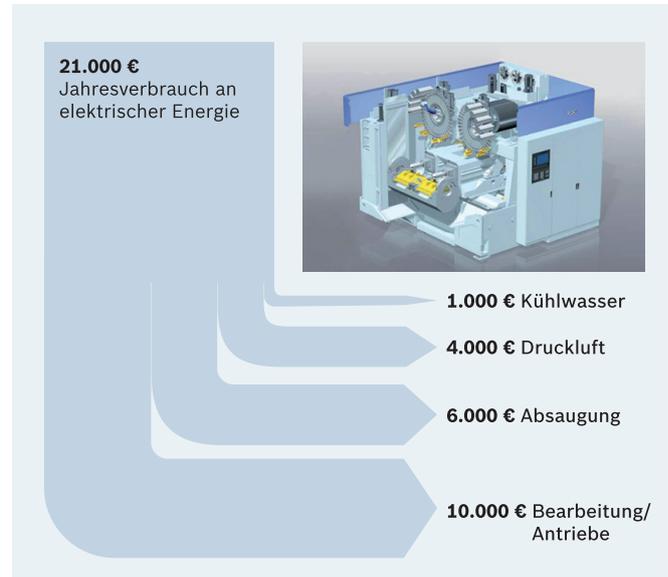


Abb. 96: Bearbeitungszentrum G320 der GROB-Werke GmbH & Co. KG, Mindelheim

Bei der G320 fällt der vermeintlich ungewöhnlich niedrige Anteil für das Thema Kühlung auf. Die Darstellung fasst alle elektrischen Antriebe innerhalb der Maschine im Strang „Bearbeitung/Antriebe“ zusammen. „Kühlwasser“ wie auch z. B. „Druckluft“ bezieht sich auf die Energien, die in externen Anlagen (zentrales Kühlwassernetz im Werk, zentrale Druckluftherzeugung) zusätzlich für den Betrieb der Maschine aufgewendet werden müssen. Hier zeigt sich, wie wichtig eine saubere und klare Definition der Systemgrenzen für eine Betrachtung ist, vor allem wenn die Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle übertragen werden sollen.

In der Darstellung werden aus Gründen der Übersichtlichkeit immer die Hauptstellhebel an den nicht optimierten Maschinen und die Lösungen hierfür i. d. R. in Aufzählungsform dargestellt und den verschiedenen 4EE-Hebeln zugeordnet. Die Maßnahmen sind eine zusammenfassende Darstellung aus den Ergebnissen der beiden betrachteten Bearbeitungszentren der Firmen GROB-Werke GmbH & Co. KG, Mindelheim und STAMA Maschinenfabrik GmbH, Schlierbach.

4EE-Hebel „Energy on Demand“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ Der Kühlschmierstoff (KSS) wird nicht bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt. Der anteilige Energiebedarf ist sehr hoch.
- ▶ „Die in der Maschine benötigte hydraulische Leistung wird nicht bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt. Der anteilige Energiebedarf ist sehr hoch.
- ▶ „Die Antriebe der Hydraulik laufen permanent. Der anteilige Energiebedarf ist sehr hoch.
- ▶ „Sub-Komponenten, wie Monitore oder Absaugungen, werden im Standby-Betrieb nicht abgeschaltet
- ▶ Der Späneförderer läuft die ganze Zeit, auch wenn keine Späne erzeugt werden oder zu fördern sind

Ziel-Zustand:

- ▶ Einsatz von drehzahlgeregelten Motoren, Pumpen für KSS und Hydraulik
- ▶ Einsatz bzw. Optimierung von Abschalt- und Start-Stop-Modi (dadurch verringert sich neben der direkten Energieeinsparung auch noch der Energiebedarf für die Kühlung, da weniger Verlustwärme in die Kreisläufe bzw. in das System eingetragen wird und rückgekühlt werden muss)

4EE-Hebel „Efficient components“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ Verwendung von ineffizienten Elektromotoren
- ▶ Verwendung von ineffizienten Klemmsystemen

Ziel-Zustand:

- ▶ Die Motoren sollen im Stillstand aus der Regelung genommen werden können, d. h. sie werden abschaltbar; Nutzung vorhandener (mechanischer) Klemmungen.
- ▶ Hydraulische Klemmsysteme mit geringen Leckagen werden gewählt, wodurch der Bedarf an hydraulischer Leistung sinkt (betrifft vorrangig die Werkstückspannung).

Drehmaschinen

Innerhalb der Bosch-Top-10-Initiative wurden ebenso verschiedene Gruppen von Drehmaschinen bzw. Drehzentren untersucht. Auch hier wurde nach dem Hauptkriterium „Nass- oder Trockenbearbeitung“ und der Anzahl der Hauptbearbeitungsspindeln unterschieden. Betrachtet wurden z. B. die Maschinen der EMAG Holding GmbH, Salach (siehe Abb. 97) und der Alfred H. Schütte GmbH & Co. KG, Köln (siehe Abb. 98).



Abb. 97: Drehmaschine VSC250 Duo der EMAG Holding GmbH, Salach

Bei der EMAG Drehmaschine fällt der hohe Anteil „Sonstige“ auf. Auch an diesem Beispiel zeigt sich, dass eine detaillierte Messung eindeutige Vorteile besitzt hinsichtlich einer echten, verursachergerechten Zuordnung. Bei einem solchen Ergebnis ist es schwierig, die Verbraucher mit dem tatsächlich größten Potenzial zu identifizieren und Maßnahmen abzuleiten. Das nachfolgende Sankey-Diagramm der Schüttemaschine ist hingegen ein gutes Beispiel für eine detaillierte Messung mit hoher Aussagekraft. Unter Umrichter sind die Hauptantriebe zusammengefasst. Dies ist aus Aufwandsgründen durchaus zulässig und sinnvoll, da an den Antrieben in aller Regel keine Potenziale gehoben werden (können), da der Eingriff in die Maschine zu aufwändig und nicht wirtschaftlich darstellbar wäre.



Abb. 98: Drehmaschine SC9-26 der Alfred H. Schütte GmbH & Co. KG, Köln

Klassische Mehrspindel-Drehautomaten stellen insbesondere bezüglich der nachträglichen Verbesserung der Energieeffizienz eine besondere Herausforderung dar. Die Maschinen sind hochproduktiv (sehr kurze Zykluszeiten im Sekundenbereich, keine Werkzeugwechsler), hochkomplex und mit einer Vielzahl an Achsen und Nebenkomponten (z. B. Stangenladern) ausgestattet. Außerdem verfügen sie häufig über komplexe Hydrauliksysteme, da sie vielfach mit hydrostatischen Lagerungssystemen und/oder hydraulischen Achsen ausgestattet sind. Dieser komplexe Aufbau ist eine direkte Folge aus dem Einsatzgebiet in der Großserien- bzw. Massenfertigung.

Hydrauliksysteme, bei denen ein Motor über eine zentrale Welle mehrere Pumpen für die unterschiedlichen Kreisläufe antreibt, sind in der Praxis kaum optimierbar. Eine Optimierung wäre nur dann möglich, wenn jeder Pumpenkreis separat regelbar gemacht würde, indem jeder Pumpe ein eigener Motor zugeordnet wird, der dann wiederum einzeln geregelt werden kann. Die Nachrüstung mehrerer Motoren und die regelungstechnische Trennung scheitern häufig sowohl an den Kosten als auch am zusätzlichen Platzbedarf, der für ein solches Vorgehen notwendig würde, aber innerhalb der Anlagen weder vom Hersteller vorgesehen noch verfügbar ist. Daneben müssten die Regelungen der Pumpen hochdynamisch sein und das Abschalten bzw. Hochlaufen sowohl im Regelbetrieb als auch im Störfall in kürzesten

Zeiten erfolgen. Hier werden wiederum Grenzen von den Motorenherstellern gesetzt, da die Motoren nur für eine begrenzte Anzahl von An-/Ausschaltvorgängen pro Zeiteinheit (pro Stunde) ausgelegt sind. Das Dazwischenschalten eines hydraulischen Speichers zur Verringerung der An-/Ausschaltzyklen der Motoren ist grundsätzlich möglich, allerdings bedeutet er einen zusätzlichen Aufwand und er müsste, in Abhängigkeit der benötigten hydraulischen Leistung (Druck, Volumenstrom) ggf. sehr groß ausfallen um wirksam zu sein. Trotz dieser schwierigen Randbedingungen wurden auch in dieser Maschinengruppe noch Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert:

4EE-Hebel „Energy on Demand“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ Einsatz von ungeregelten Motoren für die Pumpen (vgl. Einschränkungen oben)
- ▶ fehlende oder unzureichende Standby-Abschaltstrategie (Zeitpunkt, Zeiträume, Umfänge)
- ▶ kein bedarfsgerechter Betrieb der Anlagenperipherie (KSS, Späneförderer, ...), da diese nicht über das NC-Programm angesprochen werden können
- ▶ standardisiertes, oft geringes Temperaturniveau mit hohem Kühlaufwand (vgl. „Einsparpotenziale durch Zerspanungstechnologie und Anlagenutzung“ auf Seite 143)

Ziel-Zustand:

- ▶ geregelte Motoren und Pumpen in den Peripheriesystemen
- ▶ Umsetzung eines (automatischen) Standby
- ▶ einatzgerechte Nutzung der Peripherie

4EE-Hebel „Efficient Components“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ Verwendung ineffizienter Motoren
- ▶ Verwendung ineffizienter Abblasdüsen zur Reinigung bzw. als Sperrabdichtung

Ziel-Zustand:

- ▶ Verwendung effizienter Motoren
- ▶ Einsatz optimierter Abblasdüsen

Grundsätzlich sind auch hier die Einsparpotenziale der Maschinen, die in Nassbearbeitung eingesetzt werden, durch die Kühlschmierstoffanlage als Verbrauchstreiber prozentual erheblich höher als die der MAE in Trockenbearbeitung. Absolut ist der Verbrauch der vergleichbaren Trockenbearbeitungsmaschinen jedoch deutlich niedriger.

Schleifmaschinen

„Ähnlich wie beim Fräsen führt auch beim Schleifen ein umlaufendes Werkzeug [...] die Schnittbewegung aus.“ [5] In der Regel ist dies eine Schleifscheibe, ein Schleifband oder ein Schleifstift. Innerhalb der Schleifverfahren werden viele verschiedene Ausprägungen unterschieden, die vorrangig abhängig vom Werkzeug, vom Werkstück und der zu bearbeitenden Fläche sind. Als die wesentlichsten Verfahren sind hier das Flach- sowie das Außen- und Innen-Rundschleifen zu nennen, welche innerhalb der Bosch-Top-10-Initiative betrachtet wurden. Eine Auswahl der innerhalb der Bosch-Top-10-Initiative betrachteten Maschinen ist in Abb. 99 und Abb. 100 dargestellt.



Abb. 99: Außenrundschleifmaschine Jucam 1000/50 mit zwei Spindeln



Abb. 100: Innenrundschleifmaschine Ultra Twiner mit zwei Spindeln, hydrostatisch, mit Hochdruckpumpen

In der Praxis zeigen sich vorrangig durch die Betreiber oftmals große Vorbehalte gegenüber Optimierungen an Fein- und Feinstbearbeitungsmaschinen, wozu auch die Schleifmaschinen gehören. Diese resultieren aus Bedenken, dass die Optimierungen qualitätsrelevant sein könnten. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen gerade bei Fein- und Feinstbearbeitungen sind die Toleranzen entsprechend gering und oftmals nur schwierig einzuhalten. Diesen Bedenken ist unbedingt Rechnung zu tragen, um die Optimierungen zum Erfolg zu bringen. Sie wurden daher bei der Auswahl und Definition der nachfolgenden Maßnahmen mit berücksichtigt:

4EE-Hebel „Energy on Demand“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ permanenter Betrieb der Nebenaggregate, z. B. der KSS-Pumpen mit „Regelung“ über Bypass
- Ziel-Zustand:

- ▶ Verzicht auf Bypass durch echte Regelung
- ▶ Nutzung von Abschalt- und Standby-Modi

4EE-Hebel „Efficient Components“

Ist-Zustand der nicht-optimierten Maschinen:

- ▶ Einsatz standardisierter, nicht effizienter Pumpen und Motoren
- ▶ keine standardisierte energieeffiziente Schaltschrankkühlung
- ▶ erhöhter Druckluftverbrauch durch Sperrluft

Ziel-Zustand:

- ▶ Verwendung von energieeffizienteren Pumpen und Motoren
- ▶ Verwendung von energieeffizienteren Schaltschrankkühlern
- ▶ Sperrluftspaltoptimierung an Spindel und Führungen, alternativ Verwendung von Bürstendichtungen

Ein weiteres großes Potenzial liegt gerade beim Schleifen (= Feinbearbeitung mit geringen Toleranzen) im Temperaturniveau der Anlage bzw. des verwendeten Kühlschmierstoffs und in der verwendeten Warmlaufstrategie. Auf diese Punkte wird im Kapitel „Einsparpotenziale durch Zerspanungstechnologie und Anlagennutzung“ auf Seite 143 separat eingegangen.

11.2 Einsparpotenziale durch Zerspanungstechnologie und Anlagennutzung

Neben den maschinenbaulichen Themen liegen weitere, erhebliche Potenziale auch im Betrieb der Maschinen. Die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit ist, Maschinen, die nicht benötigt werden, abzuschalten. Dem stehen in der Praxis oftmals zwei wesentliche Hemmnisse gegenüber:

1. technische Probleme beim Wiederanlauf gerade bei älteren Maschinen
2. Warmlaufphasen vor Beginn der Bearbeitung zu Lasten der effektiven Produktionszeit

Dem erstgenannten Problem wird oftmals begegnet, indem die Maschine nicht mehr abgeschaltet wird. Das mag auf den ersten Blick eine pragmatische Lösung sein, behebt aber natürlich in keinster Weise die eigentliche Ursache. Diese „Lösung“ beinhaltet, neben den Kosten für den nun permanenten Energieverbrauch, ein hohes Risiko: Wenn die Anlage beispielsweise aufgrund eines Defekts z. B. der Absicherung, eines Stromausfalls oder einer Fehlbedienung ungeplant stromlos gesetzt wird, kommt es zu einer ebenso ungeplanten und dann oft langen Stillstandszeit. Bedeutend sinnvoller wäre es, die Probleme, die den Wiederanlauf behindern, nachhaltig zu lösen, um eine höhere Sicherheit bei der Anlagenverfügbarkeit und geringere Energiekosten zu erhalten. Besonders kritisch ist gerade bei älteren Anlagen die Steuerung, für die oft auch keine Ersatzteile mehr frei verfügbar sind. Hier kann ein Mittelweg sein, die Steuerung zwar dauerhaft unter Strom zu lassen, aber alle sonstigen Aggregate (Pumpen, Förderer, Hydraulik, Absaugung, etc.) abzuschalten.

Weitere Ansätze zur Effizienzsteigerung ergeben sich aus den sogenannten Warmlaufzyklen bzw. -phasen. Bevor die Produktion der Bauteile beginnt (gilt genauso z. B. für Wärmeschränke in der Montage, Bäder in Reinigungsanlagen), lässt man die Anlagen warmlaufen, um eine konstante Temperatur in der Maschine zu erhalten und keinen Wärmegang während der Produktion zu bekommen. Dieses Vorgehen ist bei vielen Maschinen Standard, bei den Fein- und Feinstbearbeitungsverfahren und -maschinen aber besonders ausgeprägt. Die Erfahrung zeigt, dass diese Warmlaufzyklen oft extrem lang sind und sich über mehrere Stunden oder teilweise eine ganze Schicht hinziehen können. Praktische Überprüfungen haben jedoch gezeigt, dass hier vielfach großes Verkürzungspotenzial liegt, was neben dem Gewinn an

Produktionszeit auch eine erhebliche Energieeinsparung bedeutet. Diese Warmlaufphasen sind auch oft der Grund, dass Maschinen im Zwei-Schicht-Betrieb in der dritten Schicht nicht ausgeschaltet werden, weil ansonsten der Mitarbeiter in der ersten Schicht nicht sofort beginnen kann, sondern die Maschine erst warmlaufen lassen muss. Dieses Problem kann man auf verschiedene Weise lösen:

- ▶ Personal aus anderen Bereichen, die 3-schichtig arbeiten, schalten die Maschinen rechtzeitig vor Arbeitsbeginn der ersten Schicht ein.
- ▶ Wach- oder Sicherheitspersonal, die in manchen Zeiten anwesend sind, schalten die Maschinen rechtzeitig vor Arbeitsbeginn der ersten Schicht ein.
- ▶ Das Einschalten erfolgt über (nachgerüstete) Zeitschaltuhren.
- ▶ Das Einschalten erfolgt über ein (nachgerüstetes) Online-Tool.

Für die beiden letztgenannten Möglichkeiten sind heute verschiedene kommerzielle Lösungen am Markt erhältlich.

Temperaturniveau in der Anlage

Ein weiteres großes Potenzial liegt ebenfalls insbesondere bei den Fein- und Feinstbearbeitungsverfahren im Temperaturniveau der Anlage bzw. des verwendeten Kühlschmierstoffs. Häufig wird hier eine Temperatur von 20 °C (Normtemperatur) mit sehr geringer Toleranz (± 1 °C) eingeregelt, da die Sollmaße des Bauteils sich auf diese Temperatur beziehen. Die temperaturabhängige Maßveränderung eines Bauteils hängt von seinem Material ab und ist über eine Materialkonstante, den sogenannten Wärmeausdehnungskoeffizienten, definiert. Wenn man beispielsweise ein Bauteil immer bei 25 °C fertigt, kann durch ein entsprechend angepasstes Zielmaß (25 °C) ein Bauteil erzeugt werden, dessen Maße bei 20 °C und entsprechender Schrumpfung dann dem geforderten Sollmaß entspricht. Dieses Vorgehen nennt man Vorhalten. Technisch gesehen ist es also nicht zwingend notwendig, exakt 20 °C einzuhalten, sondern eine hohe Temperaturkonstanz zu erreichen und die entstehende Abweichung über das oben erläuterte Vorhalten

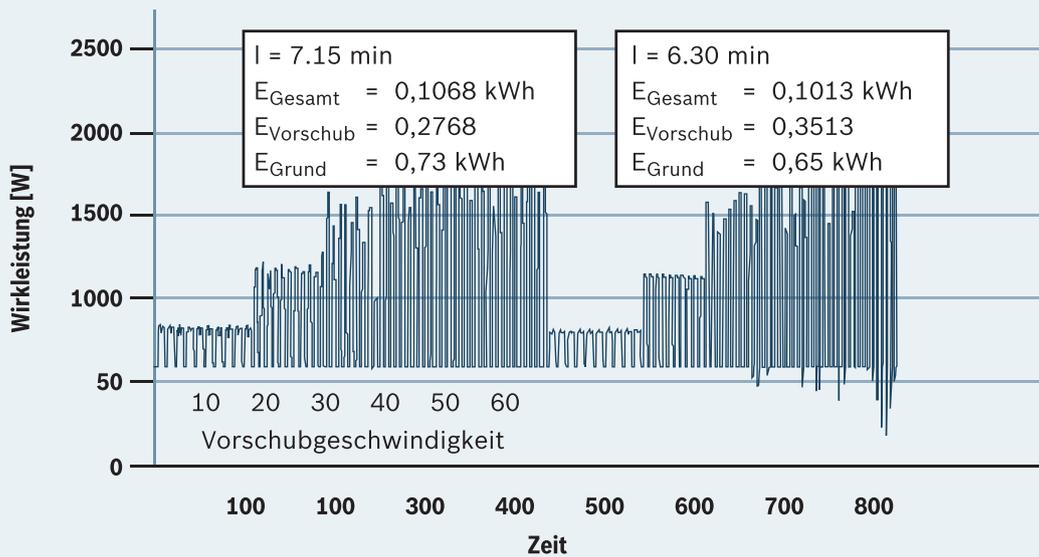
auszugleichen. Der Vorteil ist, dass man die Prozesstemperatur der Umgebungstemperatur anpassen kann und sich dadurch der Energiebedarf für die Kühlung des Kühlschmierstoffs erheblich reduziert. Beispiel: Wenn man bei einer Außentemperatur von 30 °C mit 25 °C „kaltem“ Kühlschmierstoff fertigt, benötigt man deutlich weniger Energie, als wenn man mit 20 °C „kaltem“ Kühlschmierstoff fertigt. Dieses Vorgehen wird beispielsweise in der Bosch-Gruppe bei der Fertigung von Nadeln für Kraftstoffeinspritzsysteme in der Großserie erfolgreich eingesetzt. Bei diesen Bauteilen sind Toleranzen im Sub-Mikrometer einzuhalten was auch prozesssicher gelingt.

Energieeinsparung durch geringere Prozessgeschwindigkeit?

Viele Prozesse verbrauchen weniger Energie, wenn sie langsamer ablaufen. Dieses beruht darauf, dass Energie erfordernde, quasi gegenläufige Effekte, oftmals mit der zweiten oder dritten Potenz der Geschwindigkeit ablaufen. Ein geläufiges Beispiel ist hier der Luftwiderstand beim Autofahren, der im Quadrat der gefahrenen Geschwindigkeit ansteigt. Die erste logische Konsequenz wäre, die Prozessgeschwindigkeit von Anlagen zu verringern, um so eine höhere Effizienz und

einen geringeren Verbrauch pro Werkstück zu erzielen. Diese Geschwindigkeitsreduktion steht jedoch in diametralem Gegensatz zu dem wichtigsten Optimierungskriterien einer Produktion: der Wirtschaftlichkeit, denn geringere Prozesszeiten bedeuten eine Verlängerung der Stückzeit und damit eine Reduzierung der Ausbringung pro Zeiteinheit, pro Maschine oder auch pro Mitarbeiteranwesenheitsstunde. Vor den Prinzipien eines modernen Produktionssystems ist Überproduktion zwar auch eine Art, eventuell sogar die größte Art der Verschwendung, aber sie lässt sich vermeiden, in dem man den Kundentakt grundsätzlich einhält und freie oder überschüssige Zeitanteile nicht durch langsames Arbeiten kompensiert, sondern zu ausreichend großen Blöcken zusammenfasst und in diesen dann die Arbeit komplett ruhen lässt bzw. einstellt. Je nach Verlässlichkeit der Abnahme der Produkte können diese freien Blöcke Stunden, Schichten oder auch Tage lang sein. So wird in der Praxis auch in aller Regel vorgegangen. Zurückkommend zum „Widerspruch“ zwischen Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit der Gesamtbetrachtung wurden Untersuchungen angestellt, die ein etwas überraschendes, aber vor allem erfreuliches Ergebnis gezeigt haben (siehe Abb. 101):

Beschleunigung spart Energie



- Energieeinsparung in den Achsen bei geringeren Beschleunigungen
- **Aber:** Insgesamt gleicher Energieverbrauch durch Grundlast (nur des Antriebstranges)

Quelle: PTW, TU Darmstadt

Abb. 101: Beschleunigung spart Energie

Der Gesamtenergieverbrauch bei höherer Prozessgeschwindigkeit, hier über eine höhere Beschleunigung der Achsen, ist geringer als bei dem länger dauernden Prozess. Im konkreten Beispiel um rund 5%. Die Begründung: Der durch die höhere Beschleunigung verursachte höhere Energieverbrauch wird von dem eingesparten Grundverbrauch, der aus

der Verkürzung der Prozesszeit resultiert, überkompensiert. Dass es sich hier nicht um einen Sonderfall handelt, zeigt die in Abb. 102 visualisierte Versuchsreihe. Sie zeigt eindeutig, dass die Grundlast das dominierende Element ist, sodass aus Energieeffizienzgründen die Prozessgeschwindigkeit nicht unbedingt reduziert werden muss.

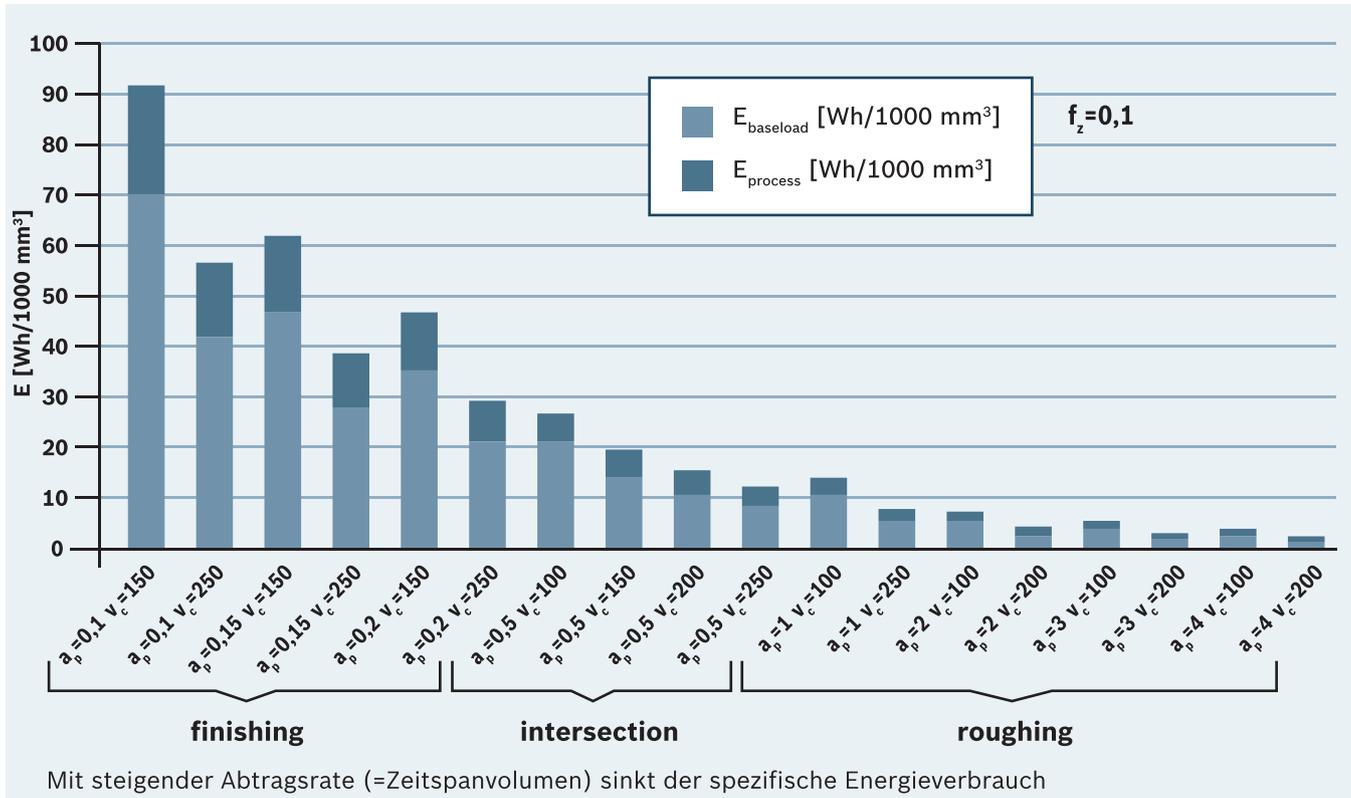


Abb. 102: Die Grundlast dominiert den Energieverbrauch

Energieeinsparung durch effiziente Programmierung

Über die CNC-Programmierung der Teileprogramme wird der Energieverbrauch einer Anlage ebenfalls

maßgeblich beeinflusst. Welche Einsparpotenziale und Tools es hier gibt, wird ausführlich in Kapitel Systemlösungen für energieeffizientes Design in diesem Handbuch erläutert, weswegen an dieser Stelle hierauf nicht näher eingegangen wird.

11.3 Zusammenfassung

Im Feld der Zerspangung gibt es eine Vielzahl an Maßnahmen, um die Energieeffizienz zu steigern, sowohl auf Seiten der Maschinenhersteller als auch auf Seiten der Maschinenbetreiber. Es wurden für verschiedene Maschinengruppen Maßnahmen aufgezeigt und dokumentiert. Details der technischen Umsetzung vor allem auf der Komponentenseite sind den entsprechenden Fachkapiteln dieses Handbuchs zu entnehmen. Für die Betreiberseite wurden ebenfalls typische Ansatzpunkte aufgezeigt, die leicht auch auf andere als die behandelten Maschinengruppen und

i. d. R. auch auf andere Technologien übertragbar sind. Viele der hier aufgezeigten Ansätze sind bewusst allgemein gehalten. Dies zum einen, um eine hohe Übertragbarkeit zu erlauben und zum anderen, weil die betrachtete Bandbreite der Anlagen, selbst innerhalb der definierten Maschinengruppen, bei detaillierterer Betrachtung den Rahmen eines solchen Buches sprengen würde und ein solches Fachbuch dennoch niemals die notwendige Detailbetrachtung der vorhandenen Anlage und ihrer Nutzung ersetzen könnte.

20 Beispiele ganzheitlicher Werksanalysen

Autor: Leo Pototzky

In diesem Kapitel wird anhand einiger durchgeführter ganzheitlicher Werksanalysen gezeigt, welche Möglichkeiten der Verminderung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen in der Praxis bestehen. Beschrieben wird, wie in den Werken mögliche Maßnahmen zur Energieeinsparung aus wirtschaftlicher Sicht dargestellt, priorisiert und in einen Realisierungsplan überführt wurden. Ganzheitlichkeit bedeutet hier, dass die Maßnahmen sowohl Maschinen und Anlagen als auch den Infrastrukturbereich betreffen und sich gegenseitig beeinflussen. Die Analysen wurden mit genau den

Werkzeugen durchgeführt, die im vorderen Teil des Buches beschrieben sind.

Das erste Beispiel beschreibt ausführlich, wie die Analysen und Maßnahmen im Werk Glenrothes in Schottland mit den in diesem Buch erklärten Darstellungsweisen und Priorisierungsmethoden durchgeführt wurden, während sich die beiden anderen Beispiele weitgehend auf die Präsentation der so erhaltenen Ergebnisse beschränken. Das in den „Brücken“ genannte Ziel von -17% ist vom ursprünglichen Projektziel, die Energieeffizienz um 20% zu verbessern, abgeleitet.

20.1 Werk Glenrothes (Schottland)

Das Werk Glenrothes liegt etwa eine Autostunde nördlich von Edinburgh in der Grafschaft Fife. Diese Gegend in Schottland ist bekannt durch viele Aktivitäten im Bereich der regenerativen Energie wie Wind- und Wellenkraft. Das Werk hat ca. 400 Mitarbeiter und stellt Radialkolbenmotoren her, die in mobilen Arbeitsmaschinen zum Einsatz kommen.

Typischerweise werden diese Motoren als Radmotoren eingesetzt, bei denen der Motor das Einzelrad direkt antreibt.

Bereits seit vielen Jahren ist das Werk nach Umweltnormen zertifiziert und hat mit dem Gewinn von einigen Umweltpreisen auf sich aufmerksam gemacht.

Ergebnis der GoGreen-Potenzialanalyse: Die „Brücke“

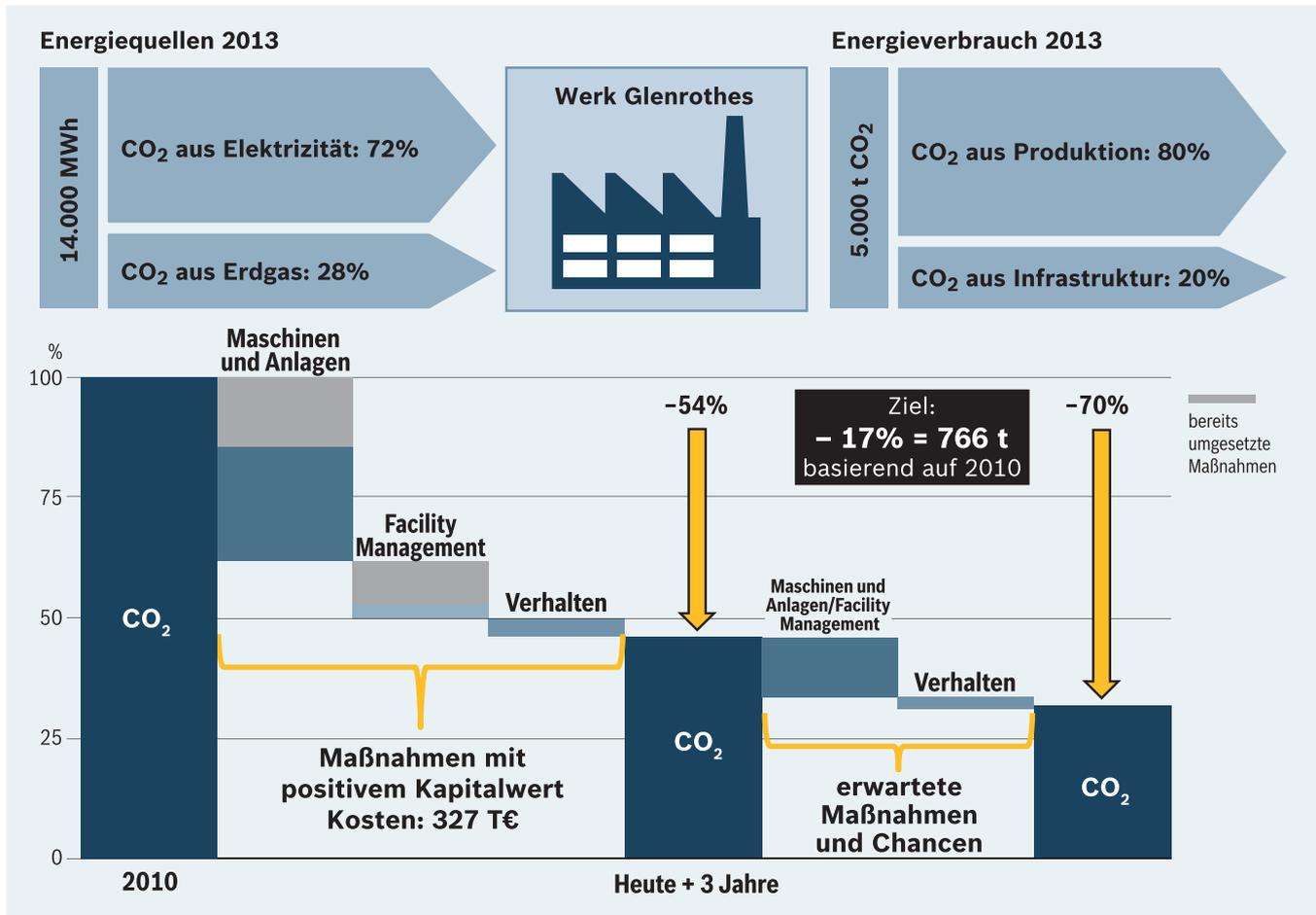


Abb. 150: Die „Brücke“ (Werk Glenrothes)

Die in Abb. 150 dargestellte sogenannte „Brücke“ ist die wichtigste Darstellungsform für das Management zur Veranschaulichung der Potenziale zur CO₂-Reduzierung. Sie zeigt die Arten von Maßnahmen zur Umsetzung der Einsparpotenziale sowie die angestrebte zukünftige Entwicklung. Zudem liefert die „Brücke“ eine Reihe weiterer Grundinformationen, im vorliegenden Fall etwa folgende:

- ▶ 72% der CO₂-Emissionen stammen aus dem Verbrauch von zugekaufter elektrischer Energie,
- ▶ 28% der CO₂-Emissionen stammen aus dem Verbrauch von Erdgas,
- ▶ 80% der CO₂-Emissionen werden durch die Produktion verursacht,
- ▶ 20% der CO₂-Emissionen werden von der Infrastruktur verursacht.

Das Säulendiagramm zeigt die Potenziale zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Vergleich zur Ausgangsposition

im Jahr 2010. Die mittlere Säule „Heute + 3 Jahre“ zeigt, dass 54% der CO₂-Emissionen mit wirtschaftlichen Möglichkeiten reduziert werden können. Dieses Potenzial gilt bei Bosch Rexroth als Referenzwert. Die grau markierten Säulenabschnitte stehen für die zum Abschluss der Analyse bereits umgesetzten Maßnahmen. Es ist gut zu erkennen, dass im Bereich der Infrastruktur (FCM) bereits ein Großteil der Maßnahmen umgesetzt wurde. Der Fokus für die Zukunft liegt damit eher im Bereich der Maschinen und Anlagen (MAE). Die rechte Seite der „Brücke“ zeigt weitere Möglichkeiten der Emissionsminderung, mit denen eine Reduktion von 70% erreicht werden kann. Die Maßnahmen auf dieser Seite entsprechen dem Status von Ideen, oder es ist deren Wirtschaftlichkeit oder technische Machbarkeit noch nicht gesichert.

Priorisierung der Maßnahmen

In Kapitel „Projektmanagement für ganzheitliche Energieeffizienz-Potenzialanalysen“ auf Seite 29 wurde bereits beschrieben, mit welchen Methoden die Ergebnisse der Untersuchungen weiter verarbeitet werden können. Mit den Daten des CO₂-Calculators lassen sich beliebige Prämissen definieren und deren Effekt auf die Maßnahmen auswerten.

Für jede der genannten Maßnahmen gibt es ein eigenes Tabellenblatt im CO₂-Calculator, in dem Folgendes genau beschrieben ist:

- ▶ die jeweilige Maschine oder Einrichtung
- ▶ die Verbesserungsmöglichkeiten der Maschine
- ▶ der Einfluss auf Energieverbrauch und Kosten

Im Beispiel Glenrothes wurden als Prämissen herangezogen:

- ▶ der Kapitalwert (NPV - Net Present Value), der die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Maßnahme beschreibt,
- ▶ die Kapital-Rücklaufdauer (PBP - Pay Back Period), die das wirtschaftliche Risiko beschreibt,
- ▶ die CO₂-Einsparung in t.

Für jede Prämissen wurde ein Ranking erstellt.

Anschließend wurde für jede Maßnahme der Mittelwert der Summe der jeweiligen Prämissen-Ergebnisse gebildet. Damit wurden die Prämissen gleich gewichtet.

Anhand dieses Wertes wurden im letzten Schritt die Maßnahmen wie folgt unterschieden:

- ▶ hocheffektive Maßnahmen (Priorität A)
- ▶ gute Maßnahmen (Priorität B)
- ▶ noch akzeptable Maßnahmen (Priorität C)

Aus den beschriebenen Ergebnissen ergibt sich das in Abb. 151 dargestellte Tabellenblatt im CO₂-Calculator:

No.	Measure	Ecological Effect		Economical Effect		Priorization	
		MAE / FCM	CO ₂ -Savings [t]	NPV [€]	PBP [a]	Average Ranking [NPV, PBP, CO ₂ abs.]	Prio
M21	Install new filter to use heat from CHP grid for washing machines	MAE	628	889.336	0,2	16,3	A
M16	Replacement of electrical radiators	FCM	80	81.121	2,4	12,7	A
M18	Implement continuous inspections for compressed air	FCM	44	54.992	1,0	12,7	A
M25	Heller MC 25	MAE	59	62.453	1,9	12,3	A
M27	Daewoo Puma 350 M	MAE	143	122.220	3,2	12,0	A
M1	Installation of motion & daylight sensors	FCM	33	41.890	0,9	12,0	A
M19	Automatic lowering of temperature on w	FCM	38	26.254	1,7	10,7	A
M23	Test Rig	MAE	36	30.921	3,1	9,0	B
M29	Chiron FZ-15KS	MAE	11	12.269	1,3	8,3	B
M24	Nakamura STW 40	MAE	18	15.818	3,1	7,7	B
M26	Knoll Filter System of Heller Maching Ce	MAE	6	6.847	0,9	7,7	B
M11	Increase room temperature of IT-room	FCM	2	3.423	0,2	7,7	B
M4	Connect direct gas-fired DHW-boilers to CHP (3x)	FCM	15	8.606	2,8	7,0	B
M6	Switching off wall-mounted gas-boilers	FCM	2	1.792	0,1	7,0	B
M28	Daewoo ACE H400P	MAE	29	2.005	9,4	4,3	C
M8	Connect all radiators to CHP-heating system	FCM	8	3.908	4,0	4,3	C
M13	Retrofit installation behind radiators (glazed link)	FCM	1	244	7,2	1,3	C

Abb. 151: Tabellenblatt CO₂-Calculator

In der Spalte „Measure“ sind – wie auch in diesem Beispiel – häufig nur die Anlagen genannt, an denen (meist technische) Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung vorgenommen werden (z. B. Test Rig). Diese werden an anderer Stelle im CO₂-Calculator genau beschrieben. In der Spalte „MAE/FCM“ ist die Unterteilung in Infrastruktur- und Maschinenmaßnahmen gut zu erkennen. Die restlichen Spalten benennen jeweils die bereits erläuterten Prämissen sowie die entsprechende Prioritätsklasse der einzelnen Maßnahme.

Dabei kann es durchaus noch Justierungen geben, weil sich Maßnahmen bedingen, früher oder später erfolgen müssen oder weil ein technisches Risiko hinzukommt. Es können Maßnahmen also auch schneller zur Umsetzung kommen oder unter Umständen sogar ganz gestrichen werden.

Die „ganzheitliche Analyse“ bei diesem Projekt wird vor allem dort erkennbar, wo Energien bzw. Maßnahmen auf beide Bereiche Einfluss nehmen, d. h. sowohl auf die

Maschine als auch auf die Infrastruktur (MAE/FCM).
Beispiel: Die Verbesserung der Filtertechnik an den Wärmetauschern von Reinigungsanlagen (erste Tabellenzeile: „Install new filter ...“; MAE-Maßnahme) ermöglicht die bessere Nutzung der Wärme aus dem Blockheizkraftwerk CHP (Combined Heat and Power Unit).

Tab. 30 zeigt die Potenziale in Prioritäten unterteilt. Es ist zu erkennen, dass ein großer Teil der Maßnahmen der Priorität A zugeordnet wurde. Dies ist insbesondere auf deren sehr gute Wirtschaftlichkeit zurückzuführen. Nur wenige Maßnahmen gehören in die Kategorien B und C. Über alle Maßnahmen ergibt sich ein spezifischer Aufwand von rund 300 € je t CO₂-Reduzierung (auf ein Jahr gerechnet). Dieser Wert liegt bei nur 50% vieler vergleichbarer Projekte und ist ein weiterer positiver Aspekt, der die Umsetzung der Maßnahmen unterstützt.

	CO ₂ -Einsparungen [t/a]	Kosteneinsparungen [€/a]	Erforderliches Budget [€]
Prio A	1.025	220.000	226.000
Prio B	89	18.000	46.000
Prio C	38	8.000	55.000
Gesamt	1.153	246.000	327.000

Tab. 30: Priorisierung der Maßnahmen im Werk Glenrothes

Hochlaufplan

Auf Basis der Priorisierungen definiert das Werk einen Zeitplan zur Umsetzung der Maßnahmen in den nächsten Jahren. Dieser mündet schließlich in einen Hochlaufplan, der die Realisierung auf der Zeitachse grafisch darstellt (siehe Abb. 152).

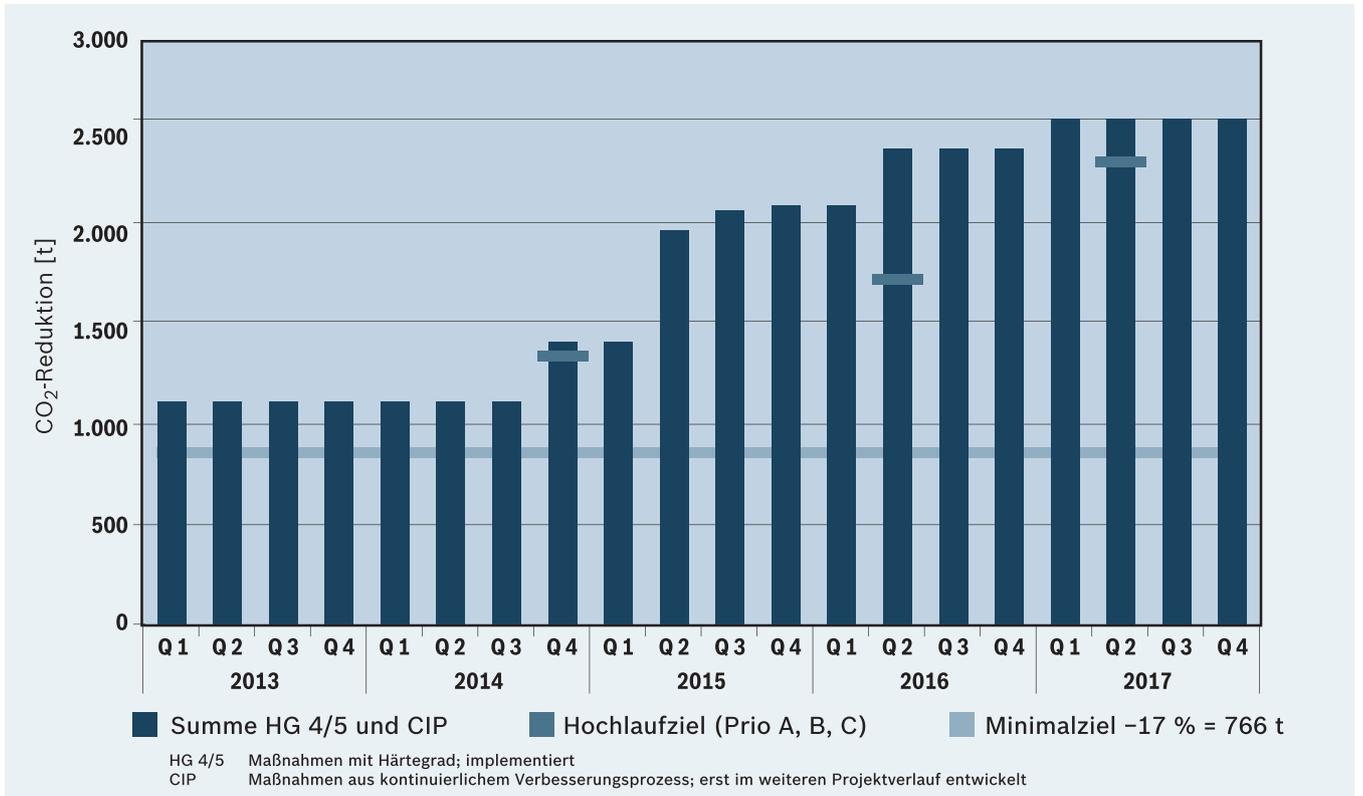


Abb. 152: Hochlaufplan für das Werk Glenrothes

Bosch Rexroth AG
Drive & Control Academy
Bahnhofplatz 2
97070 Würzburg
Tel.: 09352/18-6372
Fax: 09325/18-6882
E-Mail: academy@boschrexroth.de
www.boschrexroth.com/academy

