

Innovative Gasmotorentechnologie für die Energiewende

Klaus Payrhuber¹, Stephan Laiminger¹, Jan Zelenka², Andreas Wimmer^{2,3}

¹...GE Jenbacher GmbH & Co OG, Achenseestraße 1-3, 6200 Jenbach, +43 5244 600 0

²...LEC GmbH, Inffeldgasse 19, 8010 Graz, +43 316 873 30101

³...Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 19, 8010 Graz, +43 316 873 30101

Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende werden die Erneuerbaren Energien, allen voran Wind und Solar, immer mehr als die neue Grundlast angesehen und die thermischen Kraftwerke stellen die Residuallast dar. Dabei zeichnet sich Erdgas als sauberer Brennstoff aus. Denn aufgrund des hohen Wirkungsgrads und des niedrigeren Kohlenstoffanteils im Kraftstoff haben Gaskraftwerke einen geringen CO₂ Ausstoß. Darüber hinaus sind Gaskraftwerke sehr flexibel: Sie können sehr schnell an- und abgefahren werden, sowie sehr weit und mit hohem Wirkungsgrad in Teillast betrieben werden. Zudem punkten sie mit hoher Kraftstoffflexibilität. Lange Zeit haben Gasmotoren das untere Leistungssegment zwischen einigen 100 kW und mehreren MW abgedeckt. Mit innovativen Gasmotoren in der 10 MW Leistungsklasse werden heute aber Kraftwerke mit bis zu 200 MW realisiert.

Die Gründe für den wachsenden Trend zu Gasmotorenanlagen sind mehrschichtig: Gasmotoren können heute in wenigen Minuten auf Volllast hochgefahren werden. Gleichzeitig erlaubt es die verbesserte Teillastfähigkeit einzelne Aggregate auf eine Last von 10% zu reduzieren. Werden Gasmotoren zusätzlich mit neuen Speichertechnologien kombiniert, kann das Startverhalten nochmal wesentlich verbessert werden. In Europa werden Gasmotoren sehr oft als Blockheizkraftwerke (BHKW) eingesetzt, wodurch Brennstoffnutzungsgrade von mehr als 90% erzielt werden können. Bei der Kombination mit einer Wärmepumpe kann sogar ein Wert von über 95% erzielt werden.

Neben dieser Steigerung des Wirkungsgrads haben Gasmotoren in den letzten Jahren auch Fortschritte in der Leistungsdichte gemacht. Damit sind sie in diesen Bereichen den Dieselmotoren zumindest ebenbürtig geworden, weisen aber gleichzeitig ein deutlich besseres Emissionsverhalten auf. Entscheidend für den hochflexiblen Einsatz von Gasmotoren im Kraftwerk der Zukunft werden die Verbesserung des dynamischen Verhaltens, die Steigerung der Kraftstoffflexibilität und der Robustheit sowie die Erhöhung des Teillastwirkungsgrads unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte sein. Diese Themen bilden deshalb auch den Kern der aktuellen F&E-Aktivitäten.

Ausgehend von den zukünftigen Anforderungen sollen im Rahmen des vorliegenden Beitrags der gegenwärtige Stand der Gasmotorentechnologie und die wichtigsten Ansätze für Neuentwicklungen in den unterschiedlichen Bereichen dargestellt werden.

Keywords: Gasmotoren, BHKW, Wärmepumpe, Kraftwerk

1 Die Rolle von Gasmotoren im globalen Trend zu Distributed Power

Mit dem Umbau des Stromerzeugungsmix ändern sich auch laufend die Rahmenbedingungen für den Betrieb von Gasmotoren. Wurden Biogasmotoren früher als Grundlastanlagen ausgelegt, fahren sie heute oft in Teillast und werden im Verbund als virtuelle Kraftwerke für Netzdienstleitungen vermarktet. BHKW-Anlagen wurden in der Vergangenheit meist saisonal eingesetzt, heute sind sie häufig mit einem Wärmespeicher kombiniert, werden stromgeführt gefahren und auch im Sommer zur Spitzenlastabdeckung eingesetzt. Generell geht die Anwendung von Gasmotoren heute bis hin zu reinen Spitzenlastanlagen, die in nur wenigen Minuten auf Volllast sind und oft mehrmals täglich gestartet werden.

In Europa werden die meisten Gasmotoren als BHKW eingesetzt, bei erdgasbetriebenen Motoren sind es sogar mehr als 90%. Durch die Verbindung von Strom- und Wärmeerzeugung erreichen sie einen Brennstoffnutzungsgrad von rund 90% bzw. bei integrierter Wärmepumpe sogar von 95 bis 100% [1][2][3]. Die dezentralen Anlagen mit Gasmotoren eignen sich daher besonders gut für eine effiziente Strom- und Wärmeerzeugung am Ort des Verbrauchs. Wenn das Gas im Gasnetz in Zukunft erneuerbarer wird und mehr und mehr auch als Energiespeicher dient, werden kleinere wie größere Gasmotoren-BHKW auch zunehmend CO₂-neutraler und immer mit höchstem Brennstoffnutzungsgrad arbeiten.



Abbildung 1: Ausgewählte Beispiele mit Gasmotoren: 190-MW-Großmotorenkraftwerk Kiel, 13-MW-BHKW-Anlage in Kirchdorf an der Krems, 80-MW-„rural“-Elektrifizierung in Bangladesch

Flexible Kraftwerke und dezentrale Erzeugung bzw. Erzeugung am Ort des Verbrauchs sind ein Trend in vielen Regionen weltweit. In Industrieländern erfordert die vermehrte Installation von Wind- und Solaranlagen flexible Gaskraftwerke, um damit die Unstetigkeiten der regenerativen Energien auszugleichen. Aus diesem Grund haben sich etwa die Stadtwerke Kiel für ein modulares Kraftwerkssystem basierend auf schnell startenden Motoren entschieden. Das 190-MW-Kraftwerk besteht aus 20 J920-FleXtra-Gasmotoren, die alle individuell gefahren, aber auch gleichzeitig in weniger als fünf Minuten gestartet bzw. gestoppt werden können [4] [5]. Neben Strom liefern die Motoren auch 192 MW Wärme für das lokale Fernwärmenetz und erreichen damit insgesamt einen Brennstoffnutzungsgrad von 91%. Um höchste Betriebsflexibilität zu gewährleisten, ist die Motorenanlage zudem mit einem 30.000 m³ großen Wärmespeicher und einer Power-to-Heat-Anlage verbunden.

Die Energie AG in Oberösterreich hat in Kirchdorf an der Krems drei J624-Gasmotoren installiert und versorgt damit das lokale Fernwärmenetz. Die eingesetzten 4,4-MW-

Gasmotoren zählen zu den ersten zweistufig aufgeladenen Motoren und erreichen einen Brennstoffnutzungsgrad von rund 90%. Damit gilt die Anlage als sehr gutes Beispiel für dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung durch einen regionalen Energieversorger – ein Exempel für viele hunderte Anlagen in Europa und ein wachsendes Segment.

Ein weiteres Paradebeispiel für dezentrale Erzeugung ist eine 80-MW-Anlage in Bangladesch. Hier wurden an einem Standort insgesamt 28 J620-Gasmotoren installiert, um die lokale Stromversorgung auszubauen. Für dieses Projekt sind die Vorteile von Gasmotoren vielfältig: Einfachere Transport im Vergleich zu Generatoren von Großkraftwerken, modularer Aufbau und kürzere Errichtungszeit sowie einfachere Vorschriften und damit Genehmigung, da kein Dampfsystem zum Einsatz kommt. Zudem lässt sich der Betrieb mit der Mehrmotorenanlage sehr gut an den Bedarf anpassen. Denn es werden immer nur so viele Motoren betrieben wie Strom benötigt wird, und diese Motoren können dann mit voller Leistung und optimalen Wirkungsgrad betrieben werden.

Für Gasmotoren sprechen mehrere Gründe:

- Bedarf an dezentraler Stromerzeugung in allen Regionen weltweit
- Höchster Brennstoffnutzungsgrad von über 90% bei Kraft-Wärme-Kopplung
- Flexibler Betrieb durch modularen Aufbau und schneller Start der Anlagen in weniger als fünf Minuten
- Erdgas als sauberer Brennstoff, verfügbar im Leitungsnetz oder als CNG/LNG
- Einsatz von Alternativen zu Erdgas durch die Nutzung von erneuerbaren Gasen wie Deponiegas, Biogas, Schwachgasen oder Wasserstoff

2 Technische Weiterentwicklung am Gasmotor

2.1 Historische Entwicklung

Durch kontinuierliche Weiterentwicklung und die Einführung neuer Technologien wurde die Leistungsfähigkeit von Großgasmotoren in den vergangenen 30 Jahren deutlich verbessert. So konnte z. B. für die GE-Motorenbaureihe 6 eine Steigerung des Mitteldrucks von 12 bar auf 24 bar mit einer simultanen Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrads von 33% auf 47% erreicht werden [6]. Diese Performance ist in zahlreichen existierenden Anlagen validiert. Abhängig von Applikation und betrachteten Emissionsgrenzwerten erreichen Großgasmotoren in der Leistungsklasse bis 10 MW aktuell bereits einen Motorwirkungsgrad von 50% [7].

Dabei wurde auch die transiente Leistungsfähigkeit immer weiter gesteigert, sodass heutige Großgasmotoren wesentliche Anforderungen an Netzdienstleistungen erfüllen.

Großgasmotoren können für eine Vielzahl an unterschiedlichen Gasen und Anwendungen genutzt werden. Ein wichtiges Einsatzgebiet von GE-Gasmotoren ist etwa die Verstromung von Deponie- und Biogas, es können aber auch andere Gase wie Grubengas, Klärgas oder Fackelgas auf Ölfeldern zur lokalen Stromerzeugung verwendet werden. (Abbildung 2)



Abbildung 2: Einsatzgebiete der Gasmotoren von GE [8]

2.2 Herausforderungen und Möglichkeiten bei der weiteren Entwicklung von Großgasmotoren

Um auch den zukünftigen, strengeren Anforderungen durch Gesetzgeber und Betreiber gerecht zu werden und die Vorteile gegenüber anderen Technologien zu erhalten bzw. weiter zu steigern, ist es notwendig, die Entwicklung der Großgasmotoren weiter voranzutreiben. Wichtige Aspekte sind hier die Anwendung von neuen Entwicklungsmethoden und die Einführung von neuen Technologien. Einige der unten genannten Bausteine werden bereits in anderen Disziplinen erfolgreich eingesetzt, sodass eine Übertragung auf das System „Großgasmotorenkraftwerk“ möglich ist. Dabei ist stets das Verhältnis der geänderten Life-Cycle-Costs der Anlage zum erwarteten technologischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Mehrwert zu beachten.

2.2.1 Regelung

Reale und virtuelle Sensoren spielen im Verbrennungsmotor eine prominente Rolle bei der Sicherstellung von besten Funktionswerten über die gesamte Motorlebensdauer. Die extensive Nutzung von Sensoren ermöglicht die Erfassung, Speicherung und intelligente Weiterverarbeitung einer Vielzahl an Motorparametern [10] [11] [11]. Zur Verbrennungsregelung und zum Erkennen abnormaler Verbrennung werden fortgeschrittene Sensorprinzipien wie die Erfassung des Drucks im Brennraum, die Körperschallauswertung, die Temperaturbestimmung und optische Methoden eingesetzt. Um die daraus resultierende riesige Datenmenge effektiv nutzen zu können, muss ein Übergang vom klassischen Ingenieurwesen zu modernen Methoden der Datenanalyse eingeleitet werden. Diese sollen Einblicke und Ausblicke rein auf Basis der erfassten Daten ermöglichen [12]. „Big Data“ bevorzugt hierbei Muster und Korrelationen anstelle von Kausalzusammenhängen [13].

Neue Sensortechnologien ermöglichen ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Motor, Betriebspunkt, Verbrennung, Schmierung und Verschleiß. Durch das Kombinieren von Sensordaten und Simulationsmodellen ermöglicht ein so genanntes

Condition Monitoring System die Vorhersage der Lebensdauer einzelner Komponenten und garantiert damit die Verfügbarkeit des Motors. Weiters dient die Identifikation von Mustern und Korrelationen mithilfe der „Big Data“-Analyse anhand mehrerer Sensoren als Basis für eine verlässliche Vorhersage des zukünftigen Motorzustands. Dies ermöglicht dem Hersteller und/oder Betreiber sowohl eine Verbesserung der Betriebsstrategien und der Systemüberwachung als auch die Vorausberechnung von Modellen für eine effektive Motornutzung, von Systemantworten und des Entwicklungsprozesses.

Besonderes Augenmerk muss auf die Regelungsstrategien gelegt werden. Auf der Motorebene kann zum Beispiel durch Einführung einer Zylinder-individuellen Regelung, die auf ein Ausbalancieren der Zustände zwischen den einzelnen Zylindern abzielt, das Ansprechverhalten weiter verbessert werden [5] [7]. Modellbasierte Zustandsregler ermöglichen die simultane Ansteuerung mehrerer Aktuatoren und vermeiden dadurch unerwünschte Interaktionen [14][15].

2.2.2 Verbesserung der Aufladegruppe

Der transiente Betrieb von Motoren, insbesondere die Fähigkeit zur schnellen Leistungssteigerung, ist einerseits beschränkt durch die Anforderungen an einen sicheren und stabilen Motorbetrieb und andererseits durch die Forderung nach niedrigen Schadstoffemissionen. Der limitierende Faktor besteht hier darin, dass es gelingen muss, innerhalb kurzer Zeit ausreichend frische Zylinderladung (Luft und Kraftstoff) zur Verfügung zu stellen. Mit anderen Worten: einen schnellen Aufbau des Ladedrucks zu gewährleisten. Dies ist die Aufgabe des Aufladesystems in Kombination mit den entsprechenden Aktuatoren und Regelungsstrategien [16]. Aktueller Stand der Technik ist dabei die Verwendung von Drosselklappen, Verdichterrezirkulation, Turbinenbypassen und variabler Turbinengeometrie. Neuere Ansätze zielen darauf ab, die Drehzahlerhöhung der Lader zu beeinflussen oder direkt auf den Einlassprozess in den Zylinder einzugreifen. Drei dieser Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die Integration von Generatoren in das Aufladesystem (**Turbo-Compound**) ermöglicht neben einer Erhöhung der Leistungsabgabe im Stationärbetrieb auch eine Verbesserung des Transientverhaltens. Realisiert werden kann dies durch die Integration von Leistungsturbinen in das System. Diese ermöglichen es, die Primärturbinen anders zu dimensionieren, was wiederum deren Ansprechverhalten beschleunigt. Die Motorleistung kann durch die Menge an Abgas, welches den Leistungsturbinen zugeführt wird, geregelt werden [8] [17]. Eine Integration von Generator-/Motor-Einheiten in den Turbolader kombiniert die Ansätze des Turbo-Compounds mit jenen des E-Boosting.

Durch den Einsatz von elektrisch unterstützten Verdichtern (**E-Boosting**) kann der Ladedruckaufbau signifikant beschleunigt werden [18].

Ein variabler Ventiltrieb (**VVT**) auf der Einlassseite hat sich in zahlreichen Simulationsstudien als vorteilhaft für Wirkungsgrad und Transientverhalten erwiesen [17]. Das volle Potenzial der Einführung eines VVT-Systems am Großgasmotor kann mittels Tests am Einzylinderforschungsmotor und einer konsequenten Übertragung auf den Vollmotor mittels Simulation gut gezeigt werden [19].

2.2.3 Abgasnachbehandlung

Das Einhalten aktueller Abgasgrenzwerte für Großmotorenanwendungen war bisher allein durch Maßnahmen innerhalb des Brennraums möglich. Um den NO_x -Grenzwert der EU-Direktive 2010/75/EU von $75 \text{ mg/Nm}^3 @ 15\% \text{ O}_2$ (entspricht $200 \text{ mg/Nm}^3 @ 5\% \text{ O}_2$) [20] einzuhalten, ist bereits eine Abgasnachbehandlung erforderlich, andernfalls wären die Wirkungsgradeinbußen zu hoch [7]. Im Zuge der Revision der deutschen TA Luft wird ein NO_x -Grenzwert von $100 \text{ mg/Nm}^3 @ 5\% \text{ O}_2$ vorgeschlagen [21]. Dieser Grenzwert verlangt zwingend eine Abgasnachbehandlung mittels SCR-Katalysator. Sollten die Grenzwerte für Emissionen in Zukunft weiter verschärft werden, würde dies zusätzliche Herausforderungen für stationäre Gasmotoren bedeuten und auch erhebliche zusätzliche Kosten verursachen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Um die stationären Gasmotoren weiterzuentwickeln, bedarf es eines mehrschichtigen Ansatzes. Die LEC-Entwicklungsmethodik LDM (Abbildung 3), basierend auf Simulation, Versuchen am Einzylinderforschungsmotor und Validierung am Mehrzylindermotor, hat sich als ideale und wirtschaftlich sinnvolle Kombination herausgestellt [22]. Aufgrund des stetigen Anstiegs der Rechnerleistungen können mithilfe von Simulationen mehr Daten mit einem höheren Detaillierungsgrad in einem verträglichen zeitlichen Aufwand ermittelt werden. Dies reduziert in der Folge sowohl den materiellen als auch den zeitlichen Aufwand für die Validierung mit Einzylindermotoren am Prüfstand sowie Pilotmotoren.

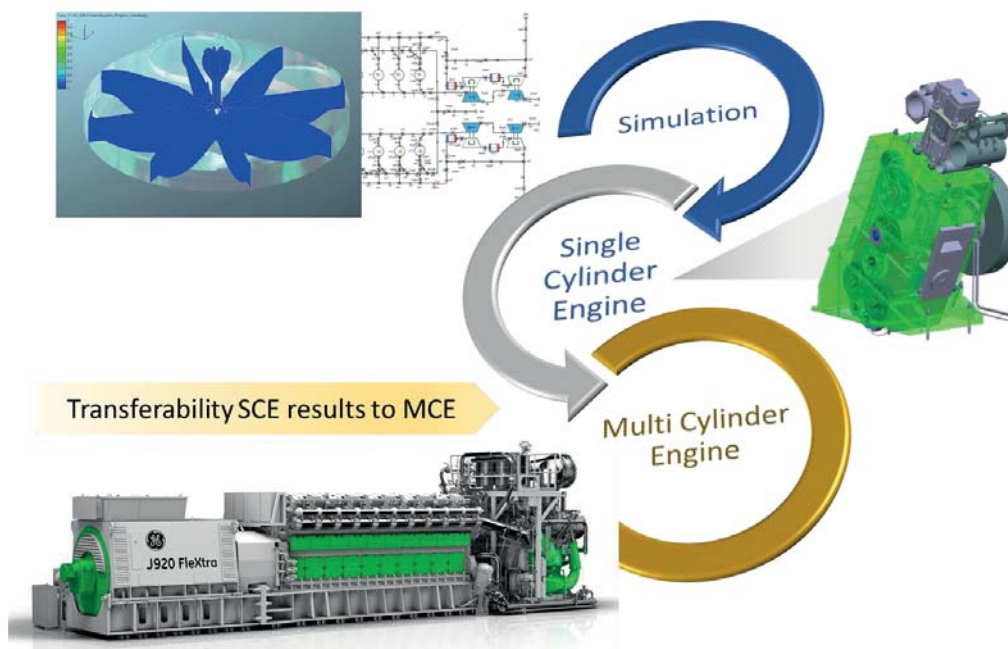


Abbildung 3: LEC-Entwicklungsmethodik LDM

4 Referenzen

- [1] Pyrhuber, K. (2016): „Neue Rekordwerte beim Gesamtwirkungsgrad von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“, *Energiekompendium* 2.0, 2016.
- [2] Payrhuber, K. (2013): “J920 FleXtra gas engine combines CHP and flexibility”, *VGB-PowerTech*, 11/2013.
- [3] Payrhuber, K., Schneider M., Schaumberger H., Thur M. (2017): “Gas engines – Combining efficiency and flexibility with CHP”, *VGB-PowerTech*, 18/2017.
- [4] Payrhuber, K., Boehm St., Koll G., Deutscher D. (2016): „In fünf Minuten von Null auf 190 Megawatt“, *Euro Heat & Power*, 11/2016.
- [5] Trapp, Ch., Birgel, A., Spyra, N., Kopecek, H., Chvatal, D. (2013): “GE’s all new J920 gas engine – A smart accretion of two-stage turbocharging, ultra lean combustion concept and intelligent controls”, *CIMAC World Congress 2013*, Shanghai, China.
- [6] Böwing, R., Douglas, K., Grotz, M., Huber, J., Kraus, M., Lang, J., Lopez, F., Trapp, Ch. (2017): „Further Improvements in Steady State and Transient Performance of GE’s Jenbacher Type 6 Gas Engines”, 16th Conference “The Working Process of the Internal Combustion Engine”, September 28-29 2017, Graz, Austria.
- [7] Trapp, Ch., Böwing, R., Birgel, A., Kopecek, H., Madl, W., Fahringer, A., Nota, F. (2017): „GE’s J920 Gasmotor – 10,3 MW Leistung bei bis zu 50 % elektrischem Wirkungsgrad“, 10. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, April 6-7 2017, Dessau-Roßlau, Germany.
- [8] Douglas, K., Lopez, F., Herrero, M., Thalhauser, J., Böwing, R. (2017): “Electric turbo-compounding application to gas engines for power generation in the 1-10 MW range”, 22. Aufladetechnische Konferenz 2017, September 28-29 2017, Dresden, Germany.
- [9] Mencher, B., Reiter, F., Glaser, A., Gollin, W., Lerchenmüller, K., Landhäußer, F., Boebel, D., Hamm, M., Spingler, T., Niewels, F., Ehret, T., Nenninger, G., Knoll, P., Kuttenger, A. (2011): „Elektrische und elektronische Systeme im Kfz“, in Reif, K. (Hrsg.): „Bosch Autoelektrik und Autoelektronik“ (technical book series: Reif, K. (Hrsg.): „Bosch Fachinformation Automobil“), 6. Edition, Wiesbaden, Germany, 2011, pp. 10f.
- [10] Reif, K. (Hrsg.) (2016): „Sensoren im Kraftfahrzeug“ (technical book series: Reif, K. (Hrsg.): „Bosch Fachinformation Automobil“), 3. Edition, Wiesbaden, Germany, 2016, pp. 1f.
- [11] Robert Bosch GmbH (2017): “Bosch company history”, Stuttgart, 2017, https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/our_history/publications_ordering/pdf_2/Bosch_History_at_a_Glance.pdf, accessed on: 2017-10-19.
- [12] Lindstaedt, St. (2017): “Knowledge-based Models and Data-driven Approaches”, in *AVL International Simulation Conference 2017*, Graz, Austria.

- [13] Mayer-Schönberger, V., Cukier, K. (2017): „Big Data, die Revolution, die unser Leben verändern wird“, 3. Edition, Munich, Germany, 2017, p. 20.
- [14] Yashiro, Y., Jiwariyavej, V., Yamashita, Y., Hoshi, T., Dickinson, P., Glover, K., Collings, N. (2015): “Development of Model Predictive Control for Two-Stage Turbocharging System”, 20. Aufladetechnische Konferenz 2015, September 24-25 2015, Dresden, Germany.
- [15] Huber, J., Kopecek, H., Hofbaur, M. (2015): “Nonlinear model predictive control of an internal combustion engine exposed to measured disturbances”, *Control Engineering Practice*, Volume 44 (2015), pp. 77-88,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.06.007>
- [16] CIMAC Working Group 17 – Gas Engines (2017): “Transient Response Behaviour of Gas Engines”, Position paper by the CIMAC Working Group “Gas Engines”, April 2011,
http://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG17/CIMAC_PPaper_TransResp_21042011_FINAL.pdf.
- [17] Jubany Arribas, E., Becchio, D., Thalhauser, J., Douglas, K., Lang, J., Tinschmann, G. (2015): „Aufladungskonzepte der nächsten Generation für Großgasmotoren“, 20. Aufladetechnische Konferenz 2015, September 24-25 2015, Dresden, Germany.
- [18] Seitz, H.F., Blankenbach, B., Gratzl, P., Schreier, H., Theissl, H., Wagner, G. (2015): “Electrically Assisted Turbocharging in Long Haul Truck Application”, 21. Aufladetechnische Konferenz 2016, September 15-16 2016, Dresden, Germany.
- [19] Christen, C., Wüthrich, J., Weisser, G., Zelenka, J., Hoff, C., Wimmer, A., Trapp, Ch., Böwing, R., Thalhauser, J. (2017): “How to translate the theoretical potential of applying variable valve timing on large stationary gas engines into actual benefits”, 16th Conference “The Working Process of the Internal Combustion Engine”, September 28-29 2017, Graz, Austria.
- [20] European Parliament and Council of the European Union (2010): “Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast)”, in: “Official Journal of the European Union”, Vol. 53, Issue L334, pp. 17 ff.
- [21] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2016): „Entwurf zur Anpassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)“, pp. 129
[ff.,http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft_entwurf_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft_entwurf_bf.pdf), accessed on: 2017-11-08.
- [22] Wimmer, A., Winter, H., Schnessl, E., Pirker, G., Dimitrov, D. (2011): “Combustion Concept Development for the Next Generation of GE Jenbacher Gas Engines”, 7th Dessau Gas Engine Conference, Dessau, Germany, March 24-25, 2011.