Study

Impact Study on Mobile Cranes

Emissions Inventory and Impact Assessment Directive 97/68/EC: Projection into a Change from Stage IV to V

W. A. Günthner · J. Freis · M. Amberger

Impact Study on Mobile Cranes

Emissions Inventory and Impact Assessment
Directive 97/68/EC: Projection into a Change from Stage IV to V and Transition from Stage III A to III B and III B to IV

Editor: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner
fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
www.fml.mw.tum.de

Authors: Willibald A. Günthner
Julia Freis
Matthias Amberger

Date: 15. December 2014

Prepared for: FEM – Product Group Cranes & Lifting Equipment
Subgroup Mobile Cranes
www.fem-eur.org

VDMA Fördertechnik und Intralogistik
www.vdma.org

Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt/Main

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Translated from the German by Heinz-Klaus Lüdersen

Printed in Germany 2015

EN

Executive Summary

With the proposal [COM (2014) 581] for a renewal of the present Directive 97/68/EC regarding emission limit values for combustion engines in non-road mobile machinery, the European Commission envisages a new stage (Stage V) with more stringent limit values for exhaust gas emissions. The mandatory application date within the engine power range 130 – 560 kW of the Stage V is 1 January 2019. Machine manufacturers, who install these engines into their machines, have 12 months' time from this date to adapt their machines to the new Stage V engines, followed by 6 months sell-off period. Previous transition regulations allowed the machine manufacturers considerably more time and flexibility for the adaption of their machines.

The shorter adaption time confront the manufacturers of mobile cranes with problems. Due to technical reasons these consider themselves not in a position to convert their diverse product portfolio to a new emission stage within 12 months. The engines are deeply integrated in the machines. That has the consequence that for any changes to the engine and exhaust gas aftertreatment system; the mobile cranes must go through a technically complex and time consuming redesign. To predict both, the necessary expenditure and the environmental impact for the conversion to the Stage V, the initial conversion of the all-terrain crane from Stage III A to III B and from Stage III B to IV was exemplarily investigated. The data for the study were collected from the four largest European mobile crane manufacturers. Jointly they have a market share of 94 % for all-terrain cranes in Europe.

The results show, that the manufacturers with their existing resources were up to now in a position to convert approximately 40 all-terrain crane models within 4.5 years. This timeframe includes the conception phase without having a new engine available. The time from when serial engines are available for the manufacturers, where no more changes need to be made, is decisive for the conversion period. Based on experience, these completed engines are available approximately 6 to 3 months prior to expiry of the old stage. From this date, the manufacturers need more than two years to adapt all of their models to the new engines and exhaust gas aftertreatment systems for the superstructures and the carriers. The costs for this amount to 37.76 million € for the conversion from Stage III A to III B. For the conversion from Stage III B to IV until the end of the conversion phase beginning of 2016, they will amount to 56.79 million €, according to the manufacturers' estimates.

Calculations for the emission inventory of all-terrain cranes show that in Europe their share of total nitrogen oxide and particle emission from non-road mobile machinery is relatively low. In the year 2020, all-terrain cranes are responsible for a share of

0.38 % of the nitrogen oxide emission of mobile machines and devices. The same applies to the particle emission; here in the year 2020 all-terrain cranes will contribute 0.57 % to the total particulate emission of mobile machines and devices.

To investigate the impact of an extension of the transition period at all-terrain cranes on the environment, health and society for the conversion to Stage V and to quantify the necessary economic effort, different scenarios were generated and compared. Initial data for the pending changes to the engine and exhaust gas aftertreatment system were collected from the three engine manufacturers, representing 100 % of the suppliers for all-terrain crane engines to the considered manufacturers. According to the information provided by the engine manufacturers, a diesel particle filter will be added, which up to now, is installed on no engine exhaust gas aftertreatment for European mobile cranes. The volume of the present exhaust gas aftertreatment system will increase by about 20 % and the weight will rise by up to 100 kg. The serial production of the new engines is planned from the middle of 2018. Thus earliest availability of completed engines is mid / end of 2018 for the crane manufacturers.

Based on this data, the mobile crane manufactures forecasted necessary design adaptations for their all-terrain cranes. According to the manufacturers, a time period of approximately 3 years from the availability of serial engines for the conversion to Stage V is needed to perform the estimated alterations. As both the design work and the necessary time needed are of a similar level as for the conversion from Stage III A to III B, the companies expects cost burden in a similar amount of 34.06 million €.

The following scenarios were generated based on the prognosis of the manufacturers in order to calculate and compare the impact of these scenarios on the environment and health / society within the frame of a Trend Impact Analysis and a Cost Effectiveness Analysis for the time horizon 2020 to 2050:

Scenario 1: Business-As-Usual-Scenario (BAU) without implementation of Stage V, serves as a benchmark for the following scenarios with implementation of Stage V.

Scenario 2: Implementation of Stage V with a compulsory transition phase of 12 months according to [COM (2014) 581] and a conversion time frame, ideally of 12 month, with the result that from 2020 only cranes with Stage V are sold in the European Union.

Scenario 3: Implementation of Stage V with a transition phase of 36 months for mobile cranes and a conversion time frame in the normal case of 36 months, with the result that from 2020, one third of the cranes are sold with Stage V and two thirds with Stage IV in the European Union; from 2021, two thirds are sold with Stage V and one third with the Stage IV; from 2022 all cranes are sold with Stage V.

Scenario 4: Implementation of Stage V with a compulsory transition phase of 12 months according to [COM (2014) 581], and a conversion time frame in the normal case of 36 months with the result, that from 2020, one third of the cranes are sold with Stage V and none with the Stage IV are sold in the European Union; from 2021 two thirds of the cranes with Stage V and none with Stage IV; from 2022 all cranes with Stage V. Non-converted crane models are not available in the years 2020 and 2021.

The calculations of the Trend Impact Analysis on the impacts on the environment show for the scenarios that the duration of the transition phase for the implementation of the Stage V can have significant implications regarding the emissions. With a too short time frame, as in Scenario 4, not all cranes can be converted by the end of the transition phase and thus cannot be sold. This means that old machines with higher exhaust emission cannot be replaced by newer ones and thus must stay longer in the population. In the short term, emissions would therefore even increase in the early stages of Stage V. This issue is confirmed by the particle emissions calculated for each year. These are, in the year 2020 for Scenario 2 at 347 t which corresponds to a share of 0.57 % of the total particle emission from mobile machinery and devices; for Scenario 3 are 348 t with a share of likewise 0.57 %; and for scenario 4 are 366 t with a share of 0.61 %. The differences between a transition phase of three years compared with one year are only marginal. Finally, the same low particle emission level of 18 t in the year 2050 is maintained with all conversion scenarios.

By the continuous reduction of the particle emission from diesel engines other sources of particle emission like tyre abrasion, brake wear, etc. will constitute the dominant emission sources in the future. Already today the particulate matter emissions from the tyre abrasion for a modern all-terrain crane with Stage IV shows a similar high value like the engine-generated particulate matter emissions from the travel operation.

The Cost Effectiveness Analysis shows, that the cost-benefit-ratio for the introduction of an emission Stage V for all-terrain cranes for the scenarios 2, 3 and 4 is negative – by more than minus 70 %. Here the engine and mobile crane manufacturers accrue the costs of 66 million €. The generated benefit is to be the avoidance of emitted air particulate matter. The real benefit here is achieved by prevention of health costs for the society caused by particle emissions. In comparison to the arising costs, this benefit for the society (avoided damage costs) is relatively low with 17 for scenario 2 and 16 million € for scenario 3 as well with about 6 million € for scenario 4. It must be recognized, however, that the time frame for the transition phase as in scenario 4 has a high impact on the social benefit.

Table of Contents

List of Abbreviations VII

1 Introduction 1

2 Background 5

2.1 European mobile crane industry 5

2.2 Classification of mobile cranes 5

2.3 Directive 97/68/EC 6

2.3.1 Specific technical problems for the adaption of new engine systems in mobile cranes 9

2.3.2 Specific marked-based problems of mobile cranes in connection with emissions regulation 11

2.4 Exemplary contemplation of the all-terrain crane for further analyses 12

2.4.1 Special setup of all-terrain cranes 12

2.4.2 Special worldwide operation purpose of the all-terrain cranes 14

3 Methodology 17

3.1 Data acquisition 17

3.2 Calculation model for exhaust gas emissions of all-terrain cranes 18

3.3 Approach for the implication rating and projection 20

4 Emission inventory 23

4.1 Nitrogen oxide emissions of all-terrain cranes 23

4.2 Particle emissions of all-terrain cranes 26

5 Implication rating of the conversion Stage III A to III B and IIIB to IV 31

5.1 Technical aspects of the conversions 31

5.2 Chronological aspects of the conversions 33

5.3 Economical consequences of the conversions 37

6 Projection for the conversion Stage IV to Stage V 41

6.1 Prognosis for technical and chronological aspects of a conversion to Stage V 41

6.1.1 Adaption at engine and exhaust gas aftertreatment system 41

6.1.2 Consequences of the engine adaption for the all-terrain crane 42

6.1.3 Prognosis of chronological aspects for the implementation of the Stage V at all-terrain cranes 47

6.2 Prognosis for economical consequences for the implementation of the Stage V at all-terrain cranes 48

6.3 Scenario generating for the conversion to Stage V 49

6.4 Trend-Impact Analysis for the determination of the exhaust gas emission inventory and determination of the consequences for the environment for the generated scenarios 54

6.4.1 Nitrogen oxide emission of all-terrain cranes of the scenarios in comparison 55

6.4.2 Particle emissions of all-terrain cranes of the scenarios in comparison .. 56

6.5 Cost-Effectiveness Analysis for the determination of the consequences for the society and the health of the generated scenarios 57

Bibliography IX

List of Figures XIII

List of Tables XVII

Annex A Technical explanation for the classification of mobile cranes A-1

Annex B Technical description to the setup of the carrier and superstructure of the all-terrain cranes B-1

Annex C Technical explanation to the implication rating of the conversion from Stage III A to III B and III B to IV C-1

Annex D Calculation model for exhaust gas emissions of all-terrain cranes D-1

Annex E Calculation Procedure of the Trend-Impact-Analysis E-1

Annex F Calculation Procedure and Determined Assumptions for the Cost-Effectiveness-Analysis F-1

Annex G Questionnaire for the Data Acquisition at the Engine Manufacturers G-1

Annex H Questionnaire for the Data Acquisition at Crane Manufacturers... H-1

List of Abbreviations

Abbreviation	Meaning
AGN	Exhaust gas aftertreatment system
AGR	Exhaust gas return
AT	All terrain
DOC	Diesel oxidation catalyser
DPF	Diesel particle filter
EK	European Commission
EU	European Union
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
PM	Particle mass
PN	Particle number
SCR	Selective catalytic reduction

1 Introduction

Mobile machines and devices contribute to the air pollution in Europe. In 2005 combustion engines in mobile machines and devices have been responsible for 15 percent of the nitrogen oxide emissions (NO_x) and for 5 percent of the particle emissions (PM). Limit values for the emission output of these engines in dependency on the power class are presently defined in the Directive 97/68/EC. Furthermore the Directive states for the growing stricter emission limit values appropriate implementation dates, from which a new stage applies.

Since the implementation of the Stage I in the year 1999 the limit values for the NO_x and the PM emissions for engines in mobile machines and devices have been reduced by 96 percent up to today. This corresponds to an annual reduction of 6.4 percent. In comparison to this for utility vehicles with the implementation of the Euro I in the year 1993 the limit value for the NO_x and the PM emissions up to today has been reduced by 95 percent which corresponds to an annual reduction of 4.8 percent. The developments of the emission limit values are represented in Figure 1-1.

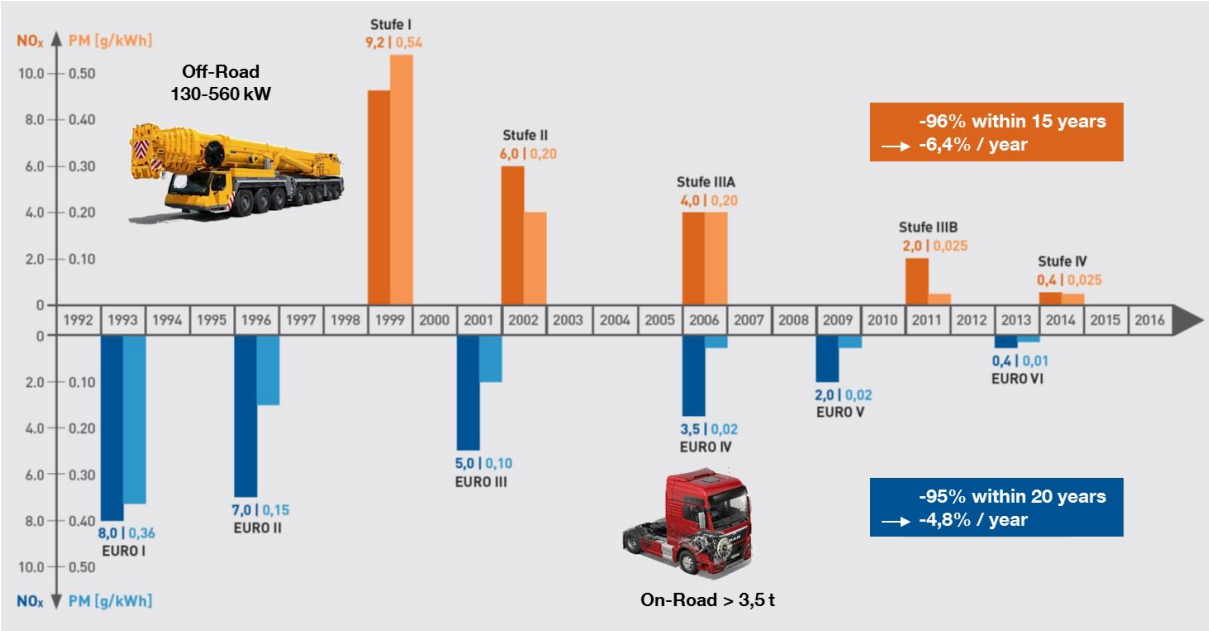

Figure 1-1: Development of the emission limit values for On-Road and Off-Road in the EU [Picture: VDMA, Liebherr, MAN]

In September 2014 the European Commission published a proposal for a new regulation of the existing directive 97/68/EC regarding the emission limit values for combustion engines for certain mobile machines and devices [COM (2014) 581].

Background for this is that the relative share of air polluting particles from combustion engines, which fall under the area of application of the Directive 97/68/EG, in the meantime a larger significance in the frame of the air quality policy of the European Union (EU) receives [2008/50/EG]. In addition further scientific findings regarding the health related impacts of particles had been detected. According to the statements of the European Commission even the limit values as determined in the Stage IV for engines in mobile machines and devices do not warrant an adequate protection against such hazardous substances. [EK-2013] Thus the proposal [COM (2014) 581] provides the implementation of a new emission stage (Stage V), which in conformity with the development in the sector of road vehicles not only aligns the limit values of the mass of particles, but also to the limit values for the particle number (PN). In particular this shall be valid for engines in the power ranges 56 to 560 kW.

Problem statement

With the proposed, stricter and for the PN emission new emission limit values of Stage V the European Commission accelerates the application of diesel particle filters (DPF). Manufacturers of mobile machines and devices thus again face at implementation of the new emission stage the great challenge, to adapt their machines to altered engines and exhaust gas aftertreatment systems. Thereof especially the mobile crane industry is affected which actually meets the requested limit values without an additional DPF. The installation of an additional component as well as further alterations at existing engines and exhaust gas after treatment systems lead to extensive adaptions and new designs for mobile cranes [FEM-2014]. In contrast to other mobile machines a vast majority of the mobile cranes are permitted for driving on public roads. With the road permission certain restrictions like dimensions, total weights and maximum axle loads apply, which after any alteration at the mobile cranes have to be maintained. Additionally on many road permitted mobile cranes two engines (for travelling and crane operation) are installed which are affected by the alterations.

In view of the short transition period of 12 months, which the original equipment manufacturers are granted for the conversion according to the proposal [COM (2014) 581], the mobile crane industry for technical reasons believes not to be in a position to convert the total multifaceted product portfolio consisting of 170 different crane types within these 12 months [FEM-2014].

Objective target of the study

Target of the study is a presentation of the technical conversation problems for the European mobile crane industry with the conversion of its multifaceted crane types to a new exhaust gas stage and the related expenditures. In the foreground is a pro-

jection for the planned conversion to Stage V with a contemplation of the various transition periods and the resulting economical and social-economical consequences. For this exemplarily the road permitted mobile crane, the so called all-terrain crane, is used as the research object. This represents with 70 to 90 percent, depending on the manufacturer, the majority of the annually sold mobile cranes in the EU.

Therefore an exhaust gas emission inventory for all-terrain cranes (AT-cranes) is generated. Based on this the contribution of AT-cranes representing the mobile cranes a PM and NO_x emission in proportion to the total mobile machines and devices is presented. Furthermore the alterations of the emissions in case of an extension of the transition period of mobile cranes are analysed.

2 Background

2.1 European mobile crane industry

Automotive cranes, also called mobile cranes, are vehicles with a special purpose of the class N 3, which are not suitable for the transportation of goods and equipped with a crane [2007/46/EC]. They can be operated on tyres, crawlers or other movable facilities (cf. Figure 2-1) and belong in the off-road field to the mobile work machines (NRMM, Non-Road Mobile Machinery). The frame Directive [2007/46/EC] in addition rules that in all road permitted mobile cranes also the propulsion engines according to 97/68/EC are to be used.

In the European Union (EU) produced mobile cranes are developed and produced for the worldwide market. The total sales of mobile cranes produced in Europe number not more than 4,000 units annually. Out of this number less than 2,000 units are delivered within the European territory. This includes all types of the 170 different mobile crane models offered by the European manufacturers. In comparison the number of models in the truck industry is significant smaller, however the sales numbers of each manufacturer with 60,000 up to 460,000 annually considerably higher [VDMA-2014]. The majority of the types of mobile cranes sold into the market are the road permitted all-terrain cranes. Based on the high sales numbers the AT-cranes represent 70 to 90 percent of the sold units for the European manufacturers. In the year 2013 the four largest European manufacturers of mobile cranes generated a turnover of 2,872 Mio. € with AT-cranes and employed app. 5,600 staff members. Together the four largest manufacturers feature a market share in the AT-crane segment of 94 % in Europe.

2.2 Classification of mobile cranes

A mobile crane according to [EN13000:2010] is a boom crane, “self propelled, which can move with or without load, without the necessity of a fixed driving surface and for which the structural safety is provided by the force of gravity“. It is operated worldwide and often changes between different continents for its operation purpose.

The mobile cranes (cf. Figure 2-1) are divided into road permitted AT-cranes and cranes mounted on a standard truck carrier (truck crane), which possess the necessary equipment for driving on public roads and at the job site, and cross-country rough-terrain cranes and crawler cranes, which both can be driven with load on the job site.

All-terrain mobile crane | Rough-terrain mobile crane | Crawler crane

Figure 2-1: Mobile cranes divided into road permitted all-terrain cranes, cross-county rough-terrain cranes and crawler cranes

In the design setup the mobile cranes consist of a chassis, which contains the traction drive of the crane and a superstructure which represents the actual crane. In fixed working positions they can by means of outriggers or other applications be supported, which increases the stability. As boom systems either telescopic booms, which can be expanded with different boom extensions or jibs, or lattice booms can be used. [EN13000:2010]

2.3 Directive 97/68/EC

All mobile cranes are operated with diesel engines (see Annex A). For the AT-crane in the superstructure engines with power between 129 and 400 kW and in the chassis between 200 and 500 kW are installed. For these engine design and power classes the following typical exhaust gas emissions accrue [DEU-2014]:

- **Carbon dioxide CO_2:** gaseous medium from the burning of hydrocarbons like e.g. diesel fuel. Carbon dioxide is considered as a greenhouse gas and is in the focus of contributing to the global warming.
- **Carbon monoxide CO:** An odourless but toxic gas, which develops at high combustion temperatures and oxygen shortage during the combustion.
- **Nitrogen oxides NO_x:** Develops primarily as nitrogen monoxide (NO) and nitrogen dioxide (NO_2) which beside others contribute to the smog.
- **Uncombusted hydrocarbons HC:** Emission due to incomplete combustion.
- **Particulate matter / particle emission PM:** Here especially soot (carbon), which develops by the diesel combustion, and emissions caused by wear (metallic abrasion) as well as aqueous sulphuric acid must be noted.

These emissions of the engines installed on mobile cranes have to correspond before being brought into circulation to the provisions of the initial Directive 97/68/EC, the alteration Directives 2002/88/EC, 2004/26 EC, 2006/105/EC, 2011/88/EC as well as the latest alteration Directive 2012/46/EU. The permissible limits values as been

seen in Figure 2-2 for the Stages I to IV are regulated since the Directive coming into force. The exhaust gas emission stages widely harmonised in the US legislation are indicated as “Tier”. The European Directive at the same time contains a harmonised procedure for the marketing of new engines of the appropriate stage on the base of the type approval and prescribes mandatorily the marking of the engines as well as certain information regarding the manufactured engines.

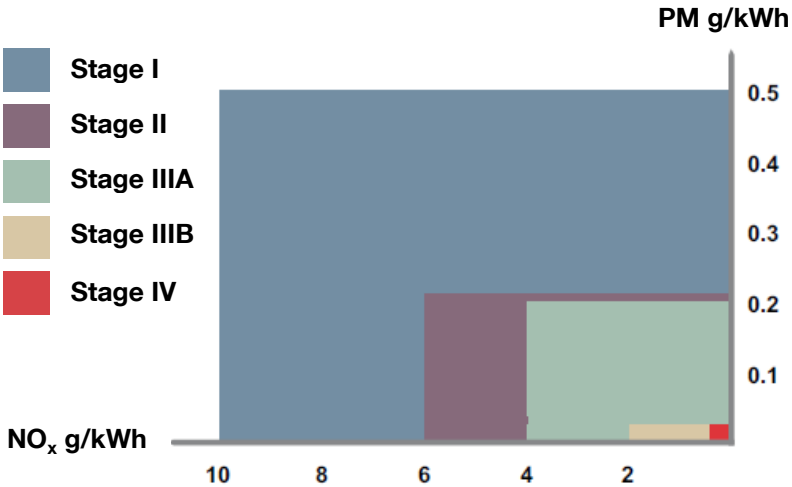

Figure 2-2: Emission limit values of the implemented stages in the EU [Vol-2010]

The exhaust gas stages are gradually implemented according to the engine power classes. The implementation data for engines installed on mobile cranes in the power ranges 75 to 560 kW are presented in Figure 2-3. Starting date of the Stage III B is the 01.01.2011 for 130-560 kW and 01.01.2012 for 75-130 kW engines. Stage IV starts on 01.01.2014 for 130-560 kW and 01.10.2014 for 75-130 kW. The intensification of the emission regulation for engines leads to altered engine designs and additional exhaust gas aftertreatment systems.

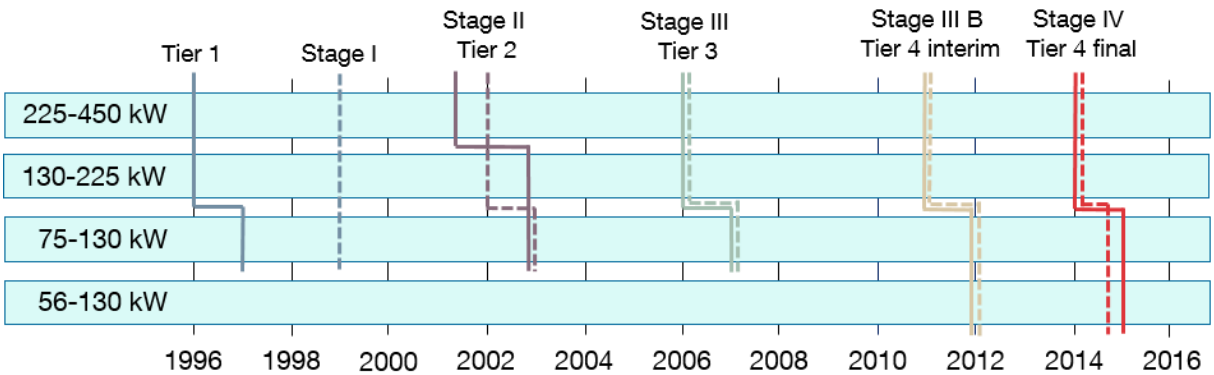

Figure 2-3: Implementation of the emission stages according to the engine power classes in the EU [Vol-2010]

To allow the manufacturers of mobile machines and devices the necessary time for design adaption at their machines and also to remodel their production lines, to purchase additional systems for the exhaust gas aftertreatment or to sell off existing inventory the Directive contains in its actual version various regulations to organise the transition to the next higher stages. These measures include the regulation to sell off inventory, the regulation for expiring serieses as well as the flexibility system.

The transition regulation for the selloff of inventory provides that engines, which have been manufactured during an emission stage and which maintain the limit values of this stage, may be put into circulation for a further period of two years after expiration of the emission stage. Decisive is the production date of the engine. This must lie before the expiration date of the emission stage. For the installation of the III A transition engines on units after the expiration date of the particular stage no timely limitation exists. The same is valid for the putting into circulation of units with III A transition engines after expiration of the stage. Decisive is the production date of the engine which must lie before the expiration date of the particular emission stage. For the installation of III B transition engines in devices as well as the putting into circulation of units with III B transition engines after expiration of the Stage IIIB the same regulation is valid as for the III A- transition engines.

With the flexibility regulation the engine manufacturers were hitherto allowed during a period between two consecutive stages of limit values to put into circulation for the installation on mobile machines and devices a limited number of engines which only maintain the limit values of the previous stage. [EK-2013], [97/68/EC]

The proposal COM (2014) 581 of the European Commission published on 24. September 2014 for the revision of the emission limit values provides for the new Stage V from 2019 beside others standards for the engines of the power classes between 75 – 560kW installed on mobile cranes, which are worldwide the most stringent. Newly added analog to the road vehicle sector are limit values for the particle number as well as further regulations. The existing flexibility system for regulating the transition periods is no longer envisaged. According to the proposal machine manufacturers only during a period of 18 months after the due date 1. January 2019 for the last time may bring machines into circulation built according to the old state of law, as shown in Figure 2-4.

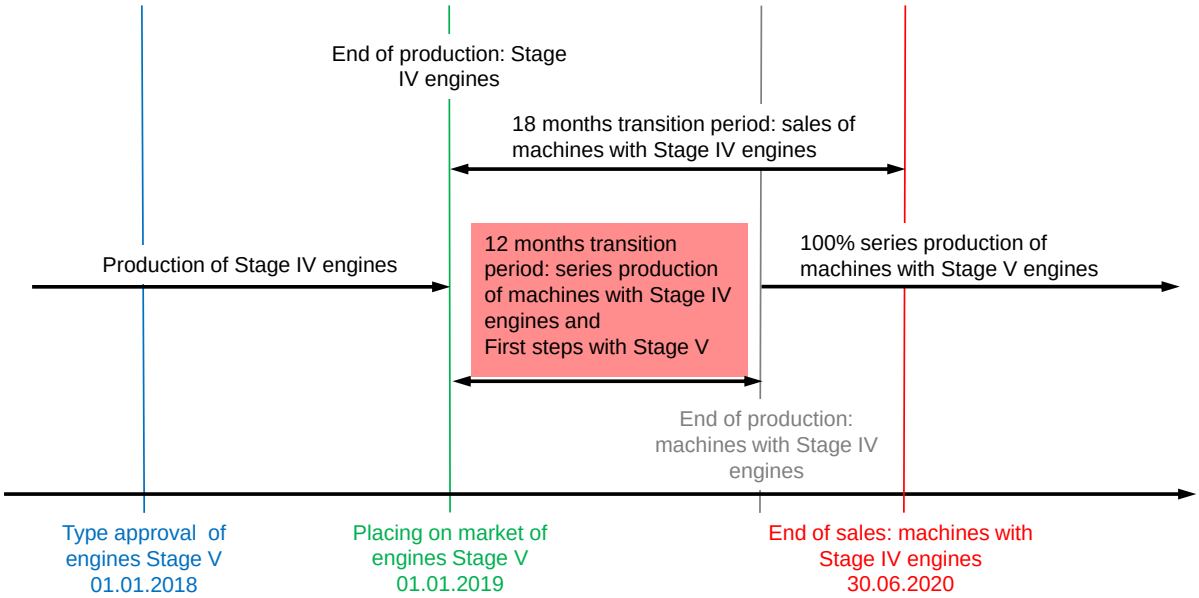

Figure 2-4: Proposal for implementation of the emission Stage V for engines of the power class 56-560 kW in the EU

2.3.1 Specific technical problems for the adaption of new engine systems in mobile cranes

The planned new regulation of the transition period for Stage V schedules from the due date 01.01.2019 the end of production of Stage IV engines. Thereafter the original equipment manufacturers have 12 months to integrate the new serial engines of the Stage V into their machines and to start up their production of Stage V machines up to the permitted end on 31.12.201. The sale of machines with Stage IV engines is envisaged until middle of 2020 as far as the machines have been built prior to the 31.12.2019.

This alteration of the transition period without the actually existing flexibility system subjects the mobile crane industry to the great challenge to convert its complete multifaceted product portfolio until end of 2019. However according to the statements of the manufacturers it is not possible to convert all of the actually existing 170 types at the same time. Here the manufacturers speak from their experiences from the conversion of their AT-cranes for previous stages. In particular the recent conversions of the cranes from the Stage III A to Stage III B as well as from Stage III B to Stage IV brought technical conflicts with the adaption of the cranes to the new engines and the new additional exhaust gas aftertreatment system. These have been resolved by time consuming design activities for developing and altering the crane with extensive efforts. The solution space for adaption is for all mobile cranes very limited due to the necessity of the road transportation. Besides the lifting of loads the approval and permission for driving on public roads is an essential feature. For the Europe wide approval of a mobile crane various legal acts according to

2007/46/EG have to be met. The most important restrictions resulting from the road approval for the AT-cranes are the maximum height of 4 m and the maximum width of 3 m as well as the maximum axle load of 12 t (in Germany) (cf. Figure 2-5). In this Figure also the position of the installed engines can be seen. These are fully integrated in the machine and are placed into the frame together with other components already at the start of assembly.

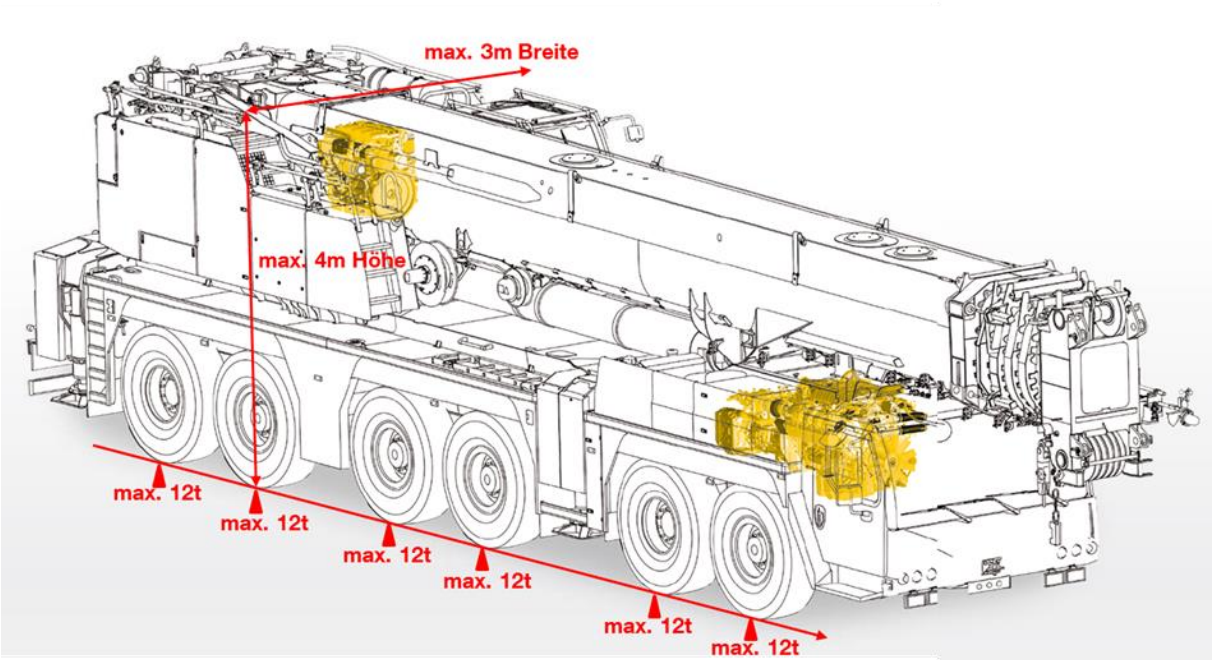

Figure 2-5: Restrictions for the AT-cranes due to the road approval

Starting point for the increasing problems with the conversion of mobile cranes is the Stage III A, as up to this stage the exhaust gas emission values could still be maintained solely by internal engine measures. To reach the limit values of the STAGE III B by reducing the NOx and PM emission in comparison to Stage III A as also to realise a further reduction of the NO_x emission at the Stage IV in comparison to the Stage III B exhaust gas aftertreatment systems (AGN) were required. Further from Stage III B far-reaching measures for the engine design, the injection, combustion and charging technology had to be applied by the engine manufacturers.

These technical alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment from Stage III B lead to an increase in components which require substantial more installation space. But this installation space at mobile cranes can't easily be enlarged. At an AT-crane the installation space is limited due to the necessary road approval. Beside the road approved AT-crane also the other mobile crane types have to keep these transportation dimensions as although they are not self-propelled they have to be transported to the job site also on public roads in transportation units.

With the increasing number of components also the total weight of the mobile cranes increases. This leads especially at AT-cranes to extensive design work due to an exceeding of the permissible weight of 12 t per axle. Is this the case the additional weight has to be reduced elsewhere and if possible spread to the remaining axles.

2.3.2 Specific marked-based problems of mobile cranes in connection with emissions regulation

Mobile cranes are also operated worldwide due to their high investment volumes between 300,000 and 15 million €. In general this are companies which purchase the cranes to rent them for worldwide jobs. But with stricter emission limit values the worldwide approval and operation of mobile cranes are handicapped. Due to diverse worldwide legislation regarding the exhaust gas emission limit values political market barriers develop. In Figure 2-6 the regulations for exhaust gas emission limit values in force in various regions for mobile machines and devices are presented. Europe, the USA and Japan have the most stringent limit values. The remainder of the world prescribe less strict limit values.

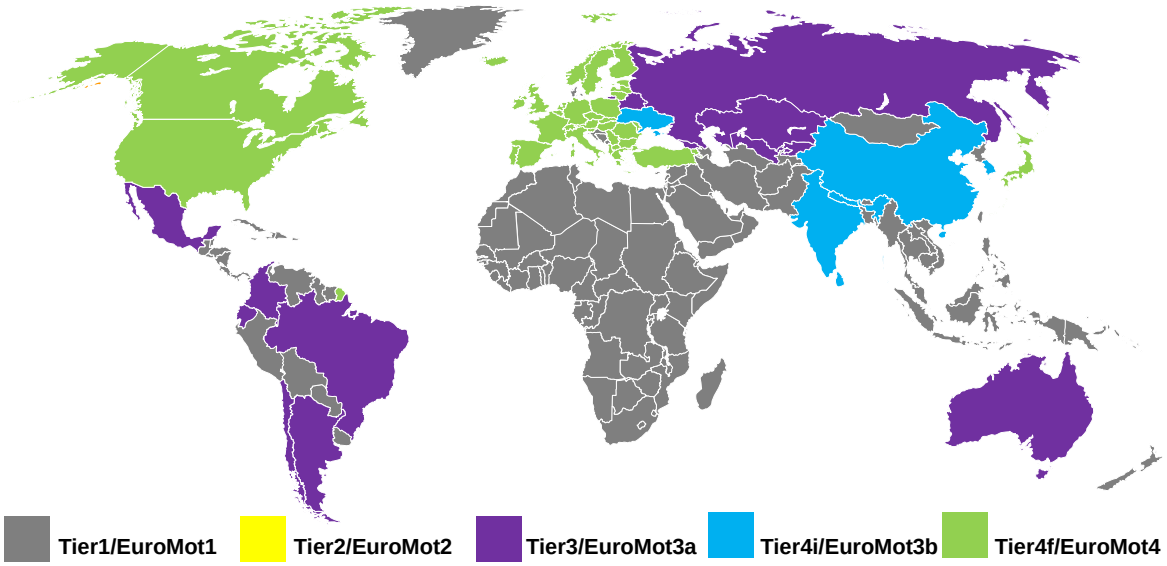

Figure 2-6: Worldwide exhaust gas emission regulations 2014

A result for globally operating rental companies is that they encounter difficulties to operate their cranes worldwide due to the different exhaust gas regulations. With the planned Stage V for the European region in Europe the most stringent limit values worldwide would exist. Making things worse actually no intensions for harmonising with the USA persist. Therein a further market barrier for the worldwide operation of mobile cranes and AT-cranes lies. The technological complex exhaust gas after-treatment with the SCR-system for maintaining the emission limit values is sensible against sulphur containing diesel fuel. From 50 ppm sulphur contents in diesel fuel

disturbances in the exhaust gas aftertreatment system occur. As can be seen in Figure 2-7, low sulphur diesel fuel mainly is available only in certain regions of Europe, North America and Australia. In addition a lacking worldwide infrastructure for supply with AdBlue, which is required as a reduction agent for the exhaust gas aftertreatment, must be noted. These technical barriers beside various regulations impede in different parts of the world the global operation of mobile cranes and dilute due to the limited utilisation possibilities the resale value of mobile cranes.

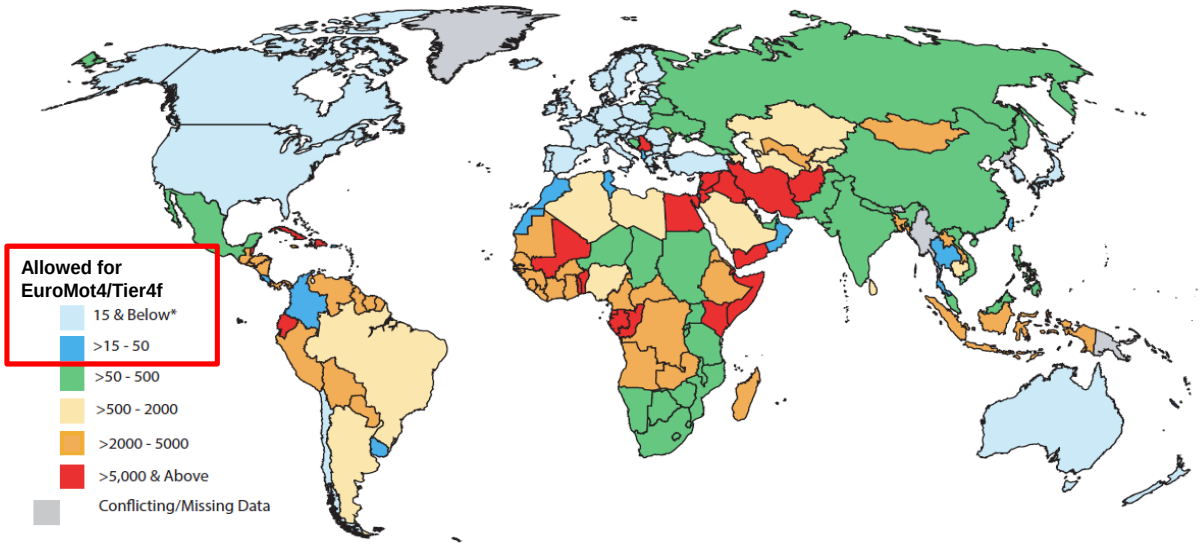

Figure 2-7: Global stages for low sulphur diesel fuel 10/2013 [UNEP-2013]

As a solution for the described problems and to assure the marketability of used cranes in non-regulated markets the manufacturers offer additionally III A versions.

2.4 Exemplary contemplation of the all-terrain crane for further analyses

The AT-crane is compared to other mobile crane types the most sold crane type in Europe and represents with the various model variations 70 to 90 percent of the sold number of units of the European manufacturers. Based on this dominance the AT-crane is used as a reference for all mobile cranes in the framework of the further research. In essence the presented restrictions and problems also apply to other mobile cranes why the necessary effort for alterations is directly transferrable.

2.4.1 Special setup of all-terrain cranes

Figure 2-8 shows an AT-crane in driving position. In the design setup the cranes consist of a carrier which contains the traction drive and a superstructure, which constitutes the actual crane. The connection between carrier and the superstructure

is realised by means of a slewing bearing which transfers the forces and moments from the superstructure to the carrier.

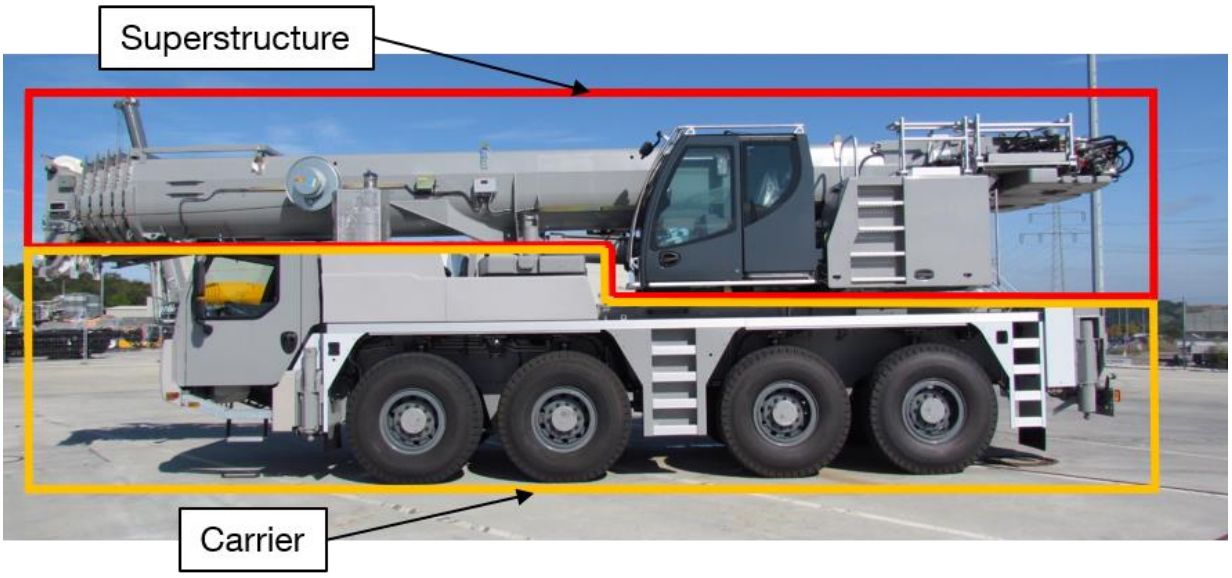

Figure 2-8: All-terrain crane in driving position

In the past for AT-cranes two different drive concepts have been established. For smaller cranes only one diesel engine was used for the traction drive and for the crane functions. For larger units from a capacity of app. 80 t in the past always a second smaller engine was installed. This engine supplied the crane functions with the necessary power. The transfer of power to the superstructure is affected at the single-engine crane hydraulically with a swivel or with a mechanical shaft. Recently also larger cranes with a single engine in the carrier are developed because by this savings of the space requirements on the superstructure and of the deadweight of the crane resulted and only one exhaust gas aftertreatment system for cleaning the exhaust gases is necessary [o.V.-2014].

Figure 2-9 shows a 4-axle AT-crane in working position with the today widely used two engine drive concept for this size. In the working position the crane doesn't rest on its tyres but is rigged up on the ground by means of supports. By the wide support base a secure position during the crane operation is warranted and the deadweight of the crane additionally adds as ballast to the counterweight which counteracts to the load moment.

At most of the AT-cranes it is a matter of telescopic boom cranes, at which the boom is raised by means of a luffing cylinder. The telescopic boom is extendable by jibs like the here shown swing-away jib to increase the radius resp. the hoisting height and with this the working range. The constricted space proportions in the area of the carrier and at the superstructure result from the limitation of the dimensions for the road travel.

Figure 2-9: Components and setup of an AT-crane

2.4.2 Special worldwide operation purpose of the all-terrain cranes

Mobile cranes are used for multiple hoisting duties on job sites, in the chemical industry or for recovery tasks. As manifold as the crane models and setup conditions for AT- cranes offered by the crane manufacturers are, as multifaceted are the areas of operation.

A first classification of the tasks can be made according to the capacity of the crane. Cranes in the range of a capacity up to app. 100t are often used very regionally in the so called taxi crane business. That means that the crane with a majority of its equipment moves from one job site to the next and is in operation only for a limited time. The length of operation typically is in the range of a few hours to days, the crane can be setup without a second crane – mostly even by only one person. In this field also are cranes which are used by the fire brigades or generally are used for accident recoveries.

Into the next range cranes with a capacity from 100 t to 300t can be classed. These cranes are operated in the civil engineering field at larger constructions like bridges or for industrial erections. As a rule the operation periods are longer and the crane can‘t be travelled anymore with its complete equipment. As the setup possibilities in this class are already very complex equipment like counterweights or boom extensions like lattice jibs must be hauled to the job site separately by trucks. The operation of these cranes is to be seen as nationwide, the typical periods of operation are in the range of days to weeks.

Large units with a maximum capacity of more than 300 t have their field of operation mainly at heavy load lifts, at erections of chemical plants and in recent times more and more for erection of wind power plants (see Figure 2-10).

Figure 2-10: Multiple hoisting tasks and fields of operation of all-terrain cranes

For these cranes a majority of the necessary equipment must be delivered to the job site by trucks as the limitation for road travel regarding axle loads and dimensions don‘t allow for the additional equipment to remain on the basic crane. For erection of the crane in many cases a further smaller crane is necessary. These cranes are in worldwide use, the periods of operation can last up to a full year.

3 Methodology

3.1 Data acquisition

In the frame of the data acquisition initially the theoretical preparatory work is carried out. This includes the collection, sighting and evaluation of existing studies, statistics, trade publications as well as legal texts.

The primary acquisition serves for generating of the necessary entrance data for the calculation of the exhaust gas inventory, the compilation of the evaluation of the consequences as well as the formulation of the projection for estimates of the impacts of the planned exhaust gas Stage V for the mobile crane industry. These entrance data have been acquired at four crane manufacturers and three engine manufacturers.

For once in personal conversations at four manufacturers for mobile cranes from the European Union by means of an ex ante compiled and provided questionnaire the data have been collected. Additionally further documents like technical documentations, picture material, time schedules and cost estimates have been provided by the manufacturers to the research centre. This information were consolidated by the research centre and anonymised processed so that no conclusions regarding the individual manufacturers could be made. The four manufacturers questioned together have a market share in the AT-crane segment of 94 % in Europe. Thereby the AT-cranes represent 70 to 90 percent of the total number of sales of mobile cranes of the manufacturers in Europe, so that the results can be seen as representative for all mobile canes and the complete industry. The used questionnaire for the mobile crane manufacturers can be taken from the Annex H.

In turn for the projection further data have been acquired from the engine manufacturers to receive information regarding the alterations at the engine as well as at the exhaust gas aftertreatment system under consideration and the anticipated time schedule for this. This information served for the manufacturers for the prognosis of the necessary adaption for their machines. By means of a questionnaire data have been collected from three engine manufacturers. For this two engine suppliers have been visited together with the crane manufacturers and in a personal interview the information collected. One engine manufacturer filled in the questionnaire himself and returned it to the research centre. The engine manufacturers questioned represent 100 percent of the suppliers who purvey engines to the four manufactures for installation on AT-cranes. The used questionnaire for the engine manufacturers can be taken from the Annex G.

3.2 Calculation model for exhaust gas emissions of all-terrain cranes

An essential element of the present studies is the examination of the exhaust gas emission behavior of mobile cranes. For one this serves for presentation of the share of NO_x and PM emissions of the operation of cranes, and also to compare the impacts of the implementation of the Stage V regarding different introductory scenarios. In the past for the calculation two different approaches could establish themselves. Beside the Top-Down-Approach resulting from the fuel consumptions and the corresponding emission factors, as an alternative exists the so called Bottom-UP-Approach which is based on the work performed by the machine [Hel-2014a]. An already repeatedly used calculation model, which follows this approach consequently is the generally recognised model TREMOD-MM, which has be developed by the ifeu – Institut für Energie und- Umweltforschung Heidelberg in [Hel-2004, Hel-2009] for the calculation of gaseous pollutants and the fuel consumption of mobile machines and devices. On the basis of the good data status for this model and the fact that models according to the Bottom-Up-Approach already have well-tried themselves [Hel-2014a, Hel-2014b, JRC-2008, EPA-1991], the model TREMOD-MM is also used in the present study for the exhaust gas emission inventory and is adapted to the crane specific characteristics. An extensive presentation of the calculation method and the data used in the frame of this study can be taken from the Annex D, Annex G and Annex H. For the calculation of the emissions of the AT-crane population it is assumed that the structure of the population regarding the crane sizes essentially corresponds to the structure of the cranes sold in the years 2011 to 2013.

In this model, based on the used engine power, a load factor, which characterises the actually retrieved power during the operation and the number of the annually fulfilled working hours, the median energy demand is estimated. With the help of the emission factors related to the energy demand, which essentially orients itself at the exhaust gas emission legislation, can beside the fuel consumption also the emission of pollutants be calculated. In Figure 3-1 the procedure for the construing of the basis emission factor is schematically presented.

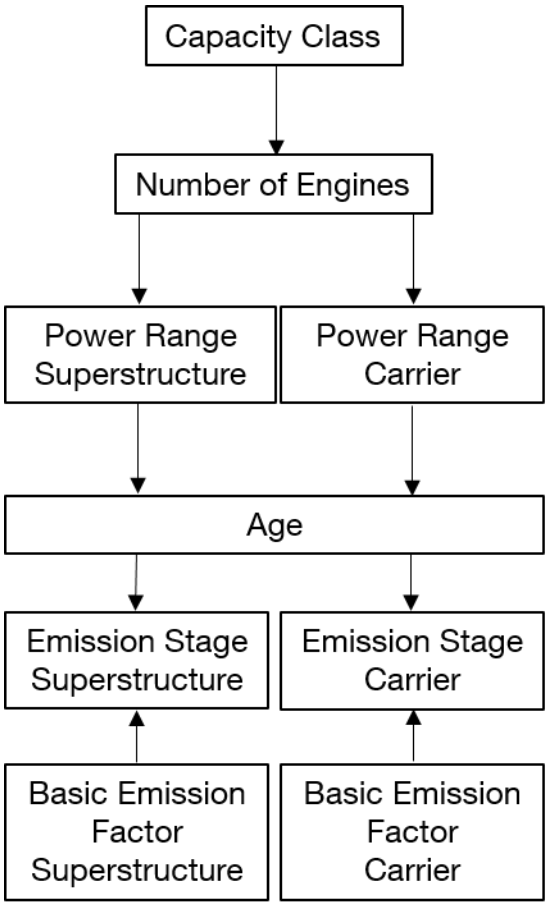

Figure 3-1: Procedure for construing of the basis emission factor for AT-cranes

Based on the classification of the AT-crane sales of the years 2011 to 2013 with regard to the capacity and the installed engines into a total of 7 classes the engine power data for the carrier and the superstructure of each class is calculated as an average value. With these power data and the age of the machines the valid emission stage for the carrier as also for the superstructure can be determined. Each emission stage than a basis emission factor is assigned to for the calculation. This basis emission factor is extended with a transient adaption factor which takes into account that the machine in comparison to the test cycle is used dynamically and an age related degradation factor, which considers the wear of the machine. With these basis data the exhaust gas emissions for the population can be calculated for each year. Additionally forecasts for the future exhaust gas emission behavior under altered boundary conditions (implementation of new stages, transition periods, etc.) are possible. The quality of the calculation assumptions is checked by additionally calculating the fuel consumption in the model and to compare this with the aggregated value [Sch-2013].

3.3 Approach for the implication rating and projection

Procedure for the implication rating

Basis for the implication rating are the accrued data and the furnished documentation from the mobile crane manufacturers questioned. Firstly the technical aspects were examined by contemplating the design alterations for the adaption of the AT-cranes to the new engines and exhaust gas aftertreatment systems.

The time frame necessary for the alteration of all models of each manufacturer for the Stage III A to III B and III B to IV have been construed for the complete industry based on the schedules and time information of the manufacturers. The calculation of the utilisation result from the available time of the employees from the offices for design, development and trial (without production/ fabrication of prototypes) in days (7 hours each) with 220 working days annually and the actual performed hours / days per year for the conversion(s) at each company. The utilisation of the total industry has been calculated from the individual calculations for each year because from one manufacturer the necessary data (performed hours / days for the conversion and the available hours / days) have not been available instead the utilisation was stated in percent.

For the presentation of the economical impacts firstly a cost summary for each manufacturer was compiled based on the data from the mobile crane manufacturers. For this the expended working hours of each manufacturer in the design / development department have been multiplied with the cost rate, or based on the cost information for the conversion of some models for all models extrapolated. Added to this were the costs stated by the manufacturers for each conversion for the production start-up, homologation and the technical approval as well as for storing the engines. All cost types have been added for the presentation of the expenditures of the mobile crane industry for the conversion of the AT-cranes from the Stage III A to III B and the Stage III B to IV. The compilation of the impacts to the environment is based on a calculation of the exhaust gas emission inventory for AT-cranes.

Procedure for the projection

The projection of the impacts of a conversion of mobile cranes to Stage V is generated by means of a prognosis based on the data acquisition as well as the findings from the implication rating by using the scenario technology.

Following this in a **Trend-Impact-Analysis** for the generated scenarios the impacts on the PM and NO_x emissions are quantitatively calculated on the basis of the compiled exhaust gas emission inventory. Based on the emission trend course up to

2020 (business as usual) the scenarios with different transition periods as future events are calculated to quantify the effectuated alterations of the trend course by the scenarios and to denominate the advantages for the environment. The used calculation model for this as well as the assumptions made can be found in Annex E.

In the frame of a **Cost-Effectiveness-Analysis** finally in accordance with the procedure of the European Commission in the Impact Assessement SWD (2014) 281 the monetary implications of the implementation of new limit values for the mobile crane industry are calculated based on the compiled scenarios. With this the advantages for the society and the health can be rated. The calculation procedure as well as the assumptions made is stated in the Annex F.

4 Emission inventory

4.1 Nitrogen oxide emissions of all-terrain cranes

Since the implementation of the exhaust gas emission Stage III B the nitrogen oxides of AT-cranes can't be anymore reduced by engine internal measures, instead manufacturer independent SCR-systems for reduction of the nitrogen oxide emission are used. In this chapter built up on the calculation models explained in chapter 3.2 and Annex D the development of emissions of particle and nitrogen oxides shall be presented. For the conversion from Stage III A to III B and Stage III B to IV similar to the real events it is assumed that the conversion couldn't be performed within one year but sprawled over a period three years, in which each year one third of the models could be converted.

Development of the emission behavior of nitrogen oxides

Figure 4-1 shows the projected development of the nitrogen oxide emission of AT-cranes in the European Union from 2005 to the year 2050.

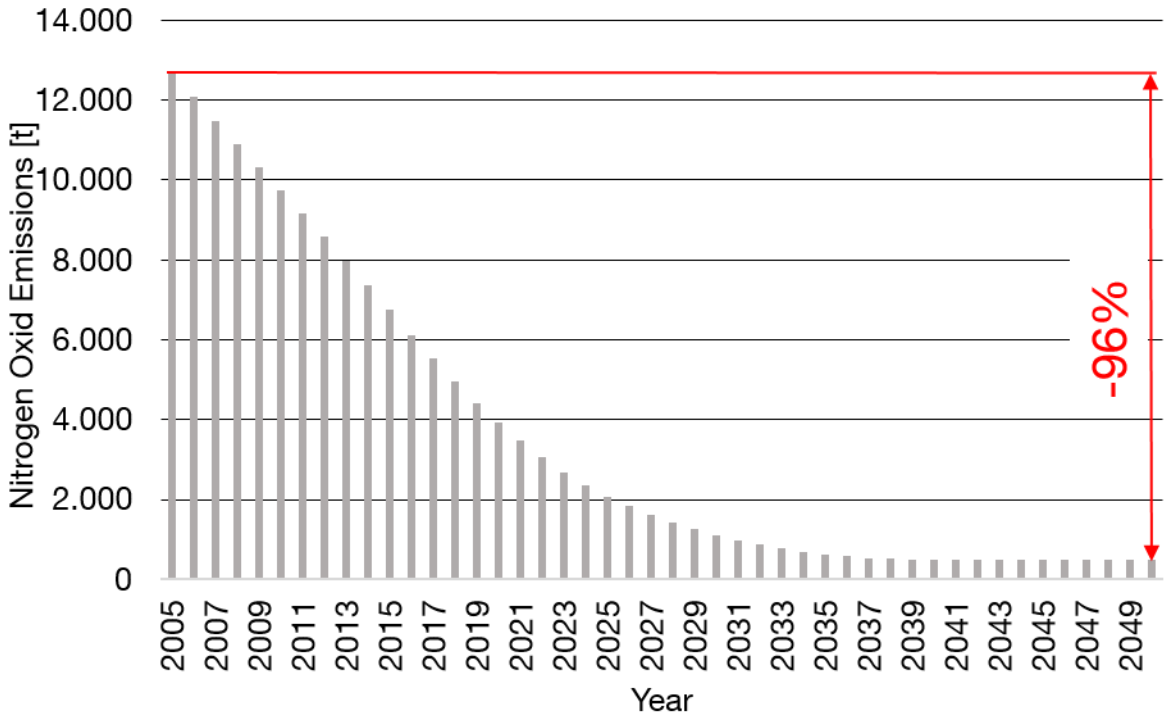

Figure 4-1: Development of the nitrogen oxide emissions (basis Stage IV) of all-terrain cranes in the European Union

By the implementation of constantly more stringent emission limit values in the start Directive 97/68/EC as well as the alteration Directives the nitrogen oxide emissions of AT-cranes since the basis year 2005 up to today could already considerably be reduced. As a result from the exchange of older units by machines with the latest exhaust gas emission stages this trend will further carry on until the year 2041, so that up to then a reduction of the nitrogen oxide emission of 96% compared to the year 2005 will be realised. As for the projected Stage V [COM (2014) 581] of the directive 97/68/EC no further intensification of the limit values regarding the nitrogen oxides are planned, from implementation of this stage no further decline of the nitrogen oxides will result.

Population and comparison with Non-Road-Mobile-Machinery

To be able to better judge the emission regarding the nitrogen oxides, which develop during the operation of AT-cranes, these emissions are compared with the total emission in the area of the Non-Road-Mobile-Machinery (NRMM). In Table 4-1 the comparison figures and the shares of the total emission, which are originated by the AT-cranes, for the years 2005 to 2020 are presented.

Table 4-1: Comparison of the nitrogen oxide emission of all-terrain cranes with mobile machines

	Value	Source
NO_x emissions AT-cranes in 2005	12.700 t	Own calculation
NO_x emissions NRMM in 2005	1.716.000 t	[Kle-2012]
Share AT-cranes in 2005	0,74 %	-
NO_x emissions AT-cranes in 2020	3.900 t	Own calculation
NO_x emissions NRMM in 2020	1.017.000 t	[Kle-2012]
Share AT-cranes in 2020	0,38 %	-

In essence the comparison shows that the AT-cranes are only responsible for a very low portion of the nitrogen oxide emission. This is due for once that the engines are in a power range which is affected since the implementation of the Directive 97/68/EC by the legislation and further that the population of app. 19,000 machines in the European Union is relative low.

Contribution of the individual population age-groups to the nitrogen oxide emissions

By the implementation of the exhaust gas emission stages since the year 1999 the AT-cranes contribute a variable, age depending amount to the total emission of the population within a year. In Figure 4-2 in this regard the break-down of the nitrogen oxide emissions for the population of the year 2014 is presented in dependence of the year of manufacturing.

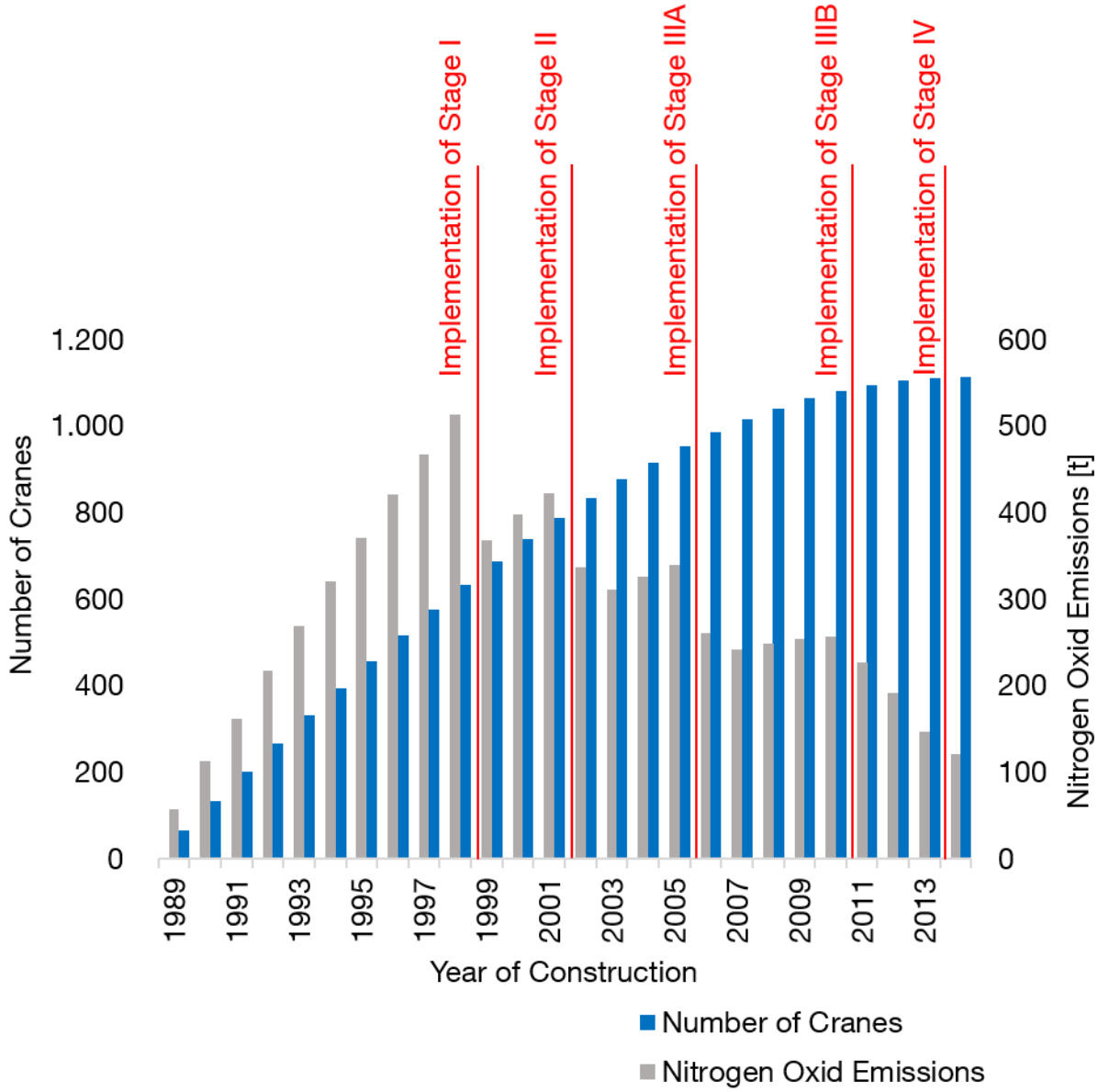

Figure 4-2: Contribution of the individual population ages to the nitrogen oxide emission in the European Union from AT-cranes for the year 2014

From this presentation emerges, that a large share of the nitrogen oxide emission can be attributed to the operation of old machines up to the year of manufacturing of 1998, although viewed from their number they only compose a small part of the population. Contrary to this by implementing of constantly more stringent limit val-

ues especially in the Stages III B and IV regarding the nitrogen oxide emissions significant lower NOx emissions for young cranes result, although these cranes represent a higher percentage according to the selected age structure of the population.

4.2 Particle emissions of all-terrain cranes

For all AT-cranes the legal requirements regarding the particle emissions up to today are matched by mere internal engine measures. An exhaust gas after treatment system with diesel particle filter is to this day not necessary for these machines and accordingly is not installed by any crane manufacturer.

Development of the emission behavior of particle emissions

In Figure 4-3 the development of the particle emission of AT-cranes starting from the basis year 2005 to the year 2050 is presented.

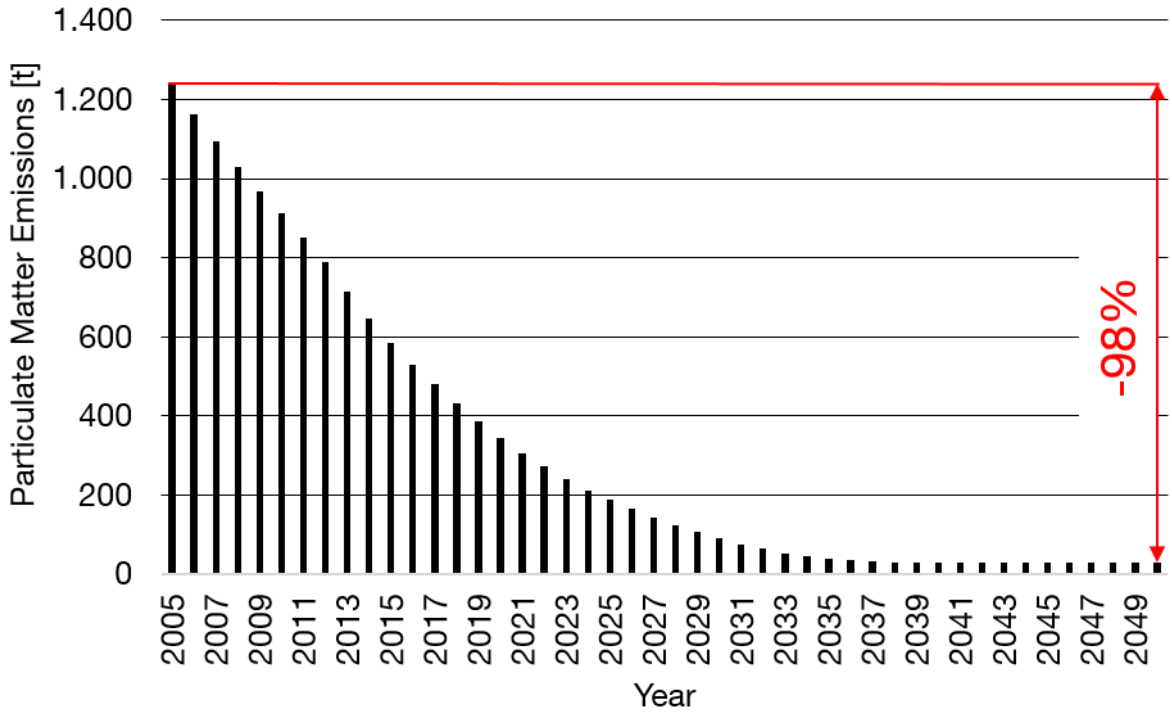

Figure 4-3: Development particle emission (basis Stage IV) of all-terrain cranes in the European Union

In this Figre a significant reduction of the particle emission since the year 2005 due to the constantly more stringent exhaust gas emission behavior of AT-cranes can be detected. Up to the year 2014 the emitted particle mass could nearly be cut in half. For the projection from the year 2020 the exhaust gas emission Stage IV will be taken as a basis. The implementation of a Stage V, as presently is discussed, would indeed by a stricter limit value lead to a further reduction compared to the shown

values, but already by the implementation of the hitherto existing stages the particle mass can be lowered up to the year 2038 by 98% compared to the year 2005.

Population and comparison to Non-Road-Mobile-Machinery

Analog to the procedure for the rating of the nitrogen oxide emissions at this point also the particle emissions of AT-cranes for the years 2005 and 2020 are compared to the values for the NMRMM. In Table 4-2 the values for AT-cranes, which are calculated with the model as described in Annex D, are confronted with the values for the total NRMM.

Table 4-2: Comparison of the particle emissions of all-terrain cranes with mobile machines

	Value	Source
Particle emissions AT-cranes in 2005	1.240 t	Own calculation
Particle emissions NRMM in 2005	139.000 t	[Kle-2012]
Share AT-cranes in 2005	0,89 %	-
Particle emissions AT-crane 2020	345 t	Own calculation
Particle emissions NRMM in 2020	60.200 t	[Kle-2012]
Share AT-cranes in 2020	0,57 %	-

In this comparison emanates that the AT-cranes are responsible for only a low share of the emissions. The reason for this result analog to the boundary conditions as described for the nitrogen oxide emissions.

Comparison to the other emission sources at AT-cranes

Beside the pure engine related particle emissions also at the AT-cranes further sources for the emission of particulate matter exist, like for instance brakes and tyres. In [Kle-2012] this topic is also contemplated and the value for the expected contribution of these emission sources estimated. As in this report it is assumed that the mass of these emissions in future stays at a similar level like the combustion engine emissions, in the existing study the actual situation at AT-cranes shall be highlighted. Figure 4-4 shows for this the comparison of a worn tyre to a new one.

Figure 4-4: Comparison of a worn tyre with a new tyre for AT-cranes

During the lifespan of the tyre of the profile mass an average of app. 26 kg is spent, which was determined by a before-after measuring of crane tyres. The accrued abrasion can up to a certain part be viewed as a particulate matter resp. particle emission. In this regard a short comparison calculation between the combustion engines generated emissions and the particle emission from the tyre abrasion is presented. Table 4-3 shows the calculation of the combustion engine generated particle emission per driven kilometre for a four-axle AT-crane.en AT-Kran.

Table 4-3: Calculation of the combustion engine generated particle emission per driven kilometre

	Value	Unit
Engine power:	300	[kW]
Load factor in carrier:	0,25	[-]
Emission factor for Stage IV:	0,025	[g/kWh]
Annual working hours in driving operation:	400	[h]
Annually covered distance in driving operation:	12.000	[km]
Particle emissions by engine in driving operation:	0,0625	[g/km]

The stated annual 12,000 km in driving operation correspond to the upper limit of the distance, which an AT-crane covers as an average in one year as stated by the manufacturers. The further data correspond to the basis data for the exhaust gas emission inventory for the capacity class from 70t to 100t. From these data results an average emission of particulate matter of 0.0625 g for each travelled km. In Table 4-4 the basis data for the calculation of the particulate matter emissions from the tyre wear are presented.

Table 4-4: Calculation of the tyre wear related particulate matter emission per travelled kilometre of an AT-crane

	Value	Unit
Profile mass for the complete crane:	208	[kg]
Tyre change interval:	30.000	[km]
Share of particles / particulate matter of the tyre wear:	0,01 to 0,10	[-]
Tyre related emissions per kilometre:	0,0693 to 0,693	[g/km]

The complete profile mass of the crane is calculated on the basis of the measured old and new tyres and the number of tyres of the crane. The tyre change interval of 30,000 km corresponds to the experience values of the crane manufacturers. For the emission of particles of the sizes PM_{10} resp. $PM_{2,5}$ the total profile mass can't be considered, but only a small portion. In [Kle-2012] this portion is stated with 1 percent for $PM_{2,5}$ and 10 percent for PM_{10}. For further information to the basis data for particulate matter emission it is referred to [Qua-2008].

Thereby the prognosis stated in [Kle-2012], that the particulate matter emission from tyre abrasion, brake wears, etc. in future will be the dominant emission source is in essence confirmed. If die $PM_{2,5}$ emissions are taken as the basis for the modern AT-cranes with the emission Stage IV already today the particulate matter emissions from the tyre wear show the same magnitude as the engine generated emissions. Thereby new emission stages in the general contemplation of the vehicle related emissions reach not anymore the high effect as it had been the case at previous stages.

Contribution of the individual population ages to the particle emissions

Similar to the nitrogen oxide emission also for the particle emission the share of the individual manufacturing years for the total emission is researched. Figure 4-4 shows the particle emission for the year 2014, separated according to the manufacturing years of the machine population.

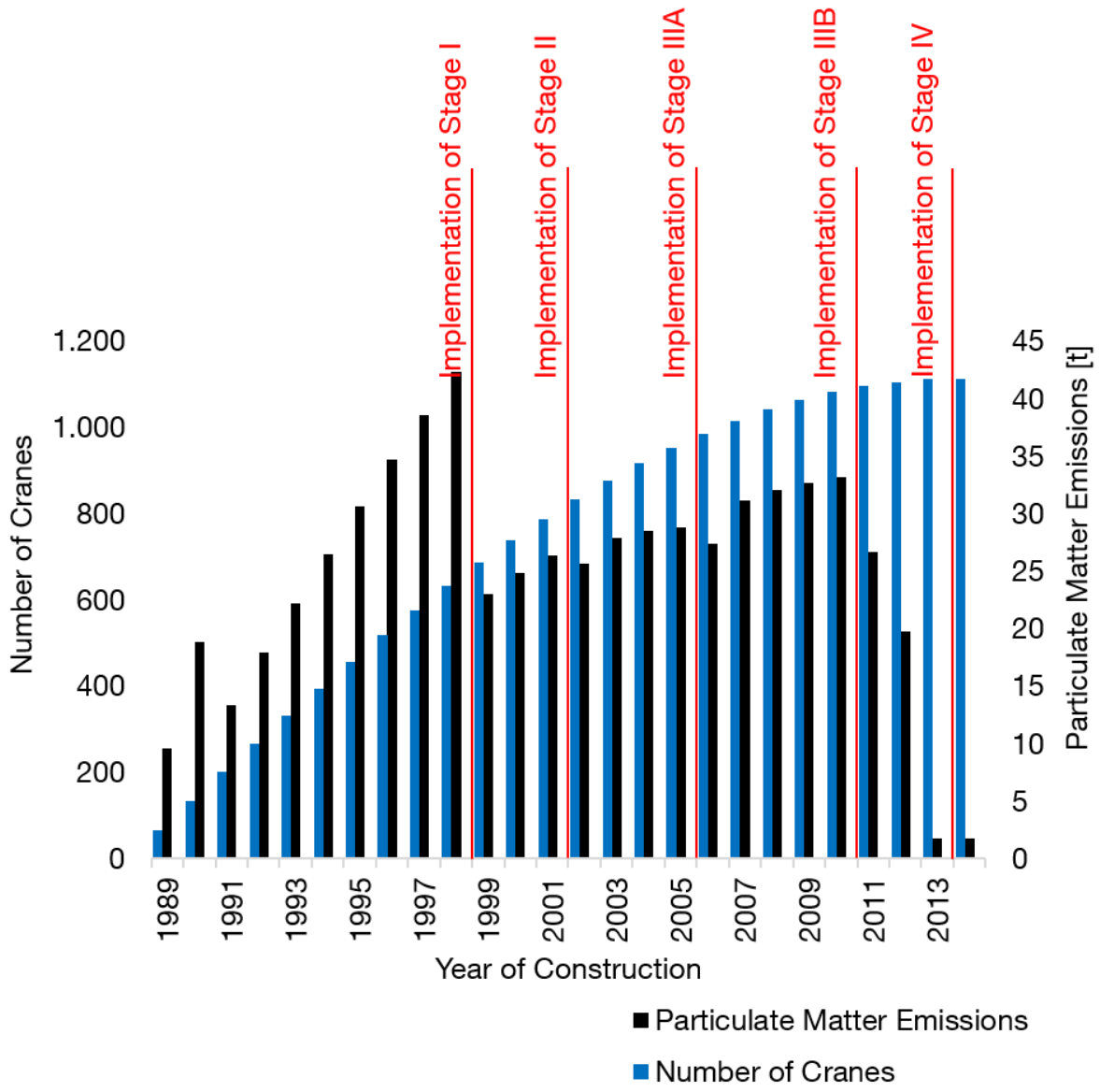

Figure 4-5: Contribution of the individual population ages to the particle emission in the European Union of AT-cranes for the year 2014

From this Figure arises that mainly old cranes, which had been delivered prior to the Directive 97/68/EC coming into force up to the manufacturing year 1998 have a high share of the particle emission, although the number of cranes of this vintage is smaller than the cranes delivered during the years 2013 or 2014. This behavior is in essence owed to the constantly more stringent legislation with regard to the particle emissions. Especially from the Stage III B a significant reduction can be observed. Due to the high average age of 13 years of the AT-cranes in Europe the penetration of the population of machines with machines of the new emission stage lasts relatively long, so that the old units with high emissions only step by step are removed from the European Union.

5 Implication rating of the conversion Stage III A to III B and IIIB to IV

5.1 Technical aspects of the conversions

With the implementation of the exhaust gas Stage III B the design of the engine was retained. However the exhaust gas aftertreatment changed from previously a pure internal engine solution to an external aftertreatment. For this in AT-cranes up to now solely the selective catalytic reduction (SCR) is used, for which an SCR catalyser is employed. For the function of the SCR catalyser the reduction agent urea is used which is injected as an aqueous dilution (AdBlue®) into the exhaust system. For maintaining the limit values for nitrogen oxide of the Stage IV the SCR technology was further developed and a new basic engine (new engine block, see Annex C) introduced. A detailed description of the alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment system can be found in the Annex C.1. In addition it turns up that from the Stage III B not only the engine is certified but the complete engine system consisting of the engine and the exhaust gas aftertreatment. This certificate expires at any alteration at the system as the manufacturer can't warrant the functionality and thus the maintaining of the required limit values anymore. Thus strict installation provisions of the engine manufacturers for the complete engine system must be complied with.

With the more stringent limit values more and more components for the exhaust gas aftertreatment and the engine are added. These components require constantly more installation space. This installation space however is limited at the AT-cranes due to the road approval with the restriction of a width of 3 m and the height of 4 m and is not extendible at will. By the additional mass from the components of the exhaust gas aftertreatment at many types the permissible total weight or the permissible axle load of 12 t is exceeded. The total weight than must be reduced elsewhere or if possible distributed to the remaining axles, so that the AT-crane still can be approved for driving on public roads. Due to the mentioned restrictions the crane manufacturers faced great challenges to convert the high number of different crane models to the new exhaust gas stages. To accommodate the additional components in the limited installation space various subassemblies in the superstructure and also in the carrier had to be altered and / or newly positioned (cf. Figure 5-1 and Figure 5-2). Hereby the solution space for the installation and the arrangement of the component was highly limited. To achieve the effect of the exhaust gas aftertreatment and hence maintain the emission limit values the installation has to strictly follow the specification of the engine manufacturers.

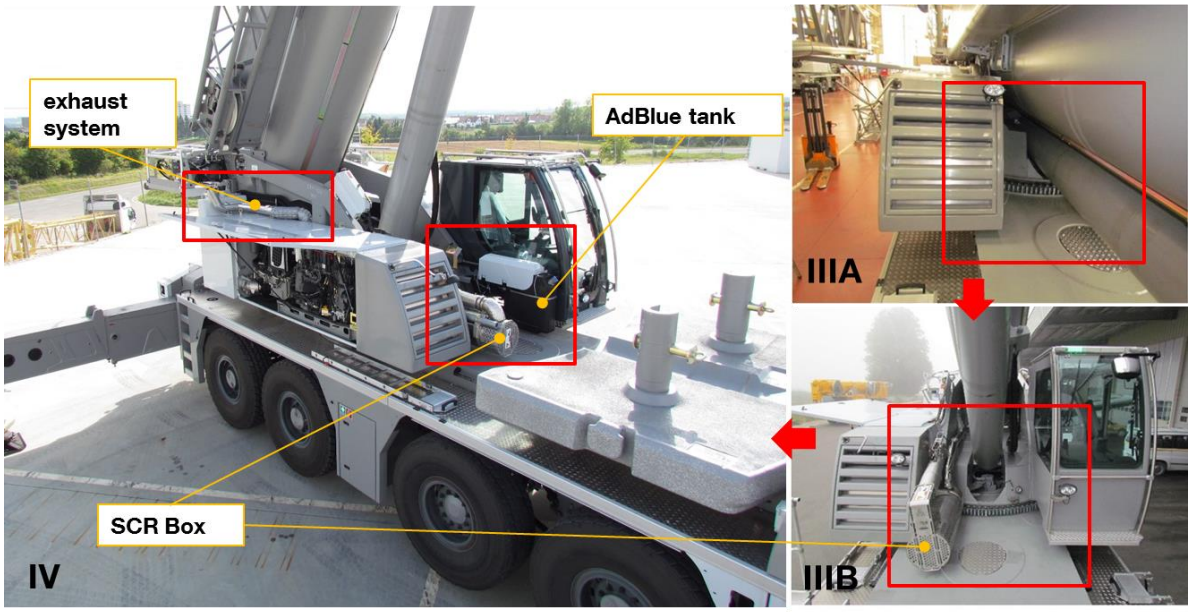

Figure 5-1: Alteration at the superstructure due to alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment, starting from the Stage III A to III B and to IV

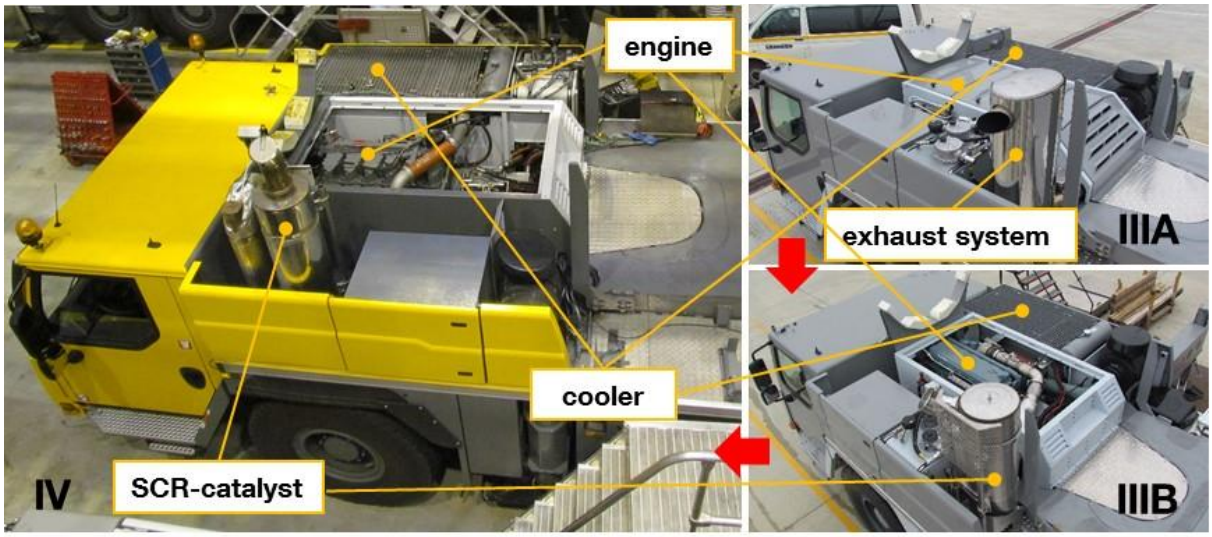

Figure 5-2: Alteration at the carrier due to alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment, starting from the Stage III A to III B and from III B to IV

With the alterations at the engine the complete periphery had to be remodelled by which further components were affected by the adaption. Especially the increase in volume and the new shape of the Stage IV engines lead to extensive alterations at the carrier frame, as the engine collided with the frame. Afterwards the function of the frame as a supporting structure had to be reconfirmed by means of FEM calculations.

Particularly the increase in weight leads to alterations of further components for compensating the additional weight or to distribute it otherwise. So partly performance derogating adaptions at the counterweight had to be performed to enable

the road approval. Elaborate descriptions regarding the implication of the engine alterations at the AT-cranes are described at the examples of the superstructure and the carrier in Annex C.

As an average app. 30 percent of the subassemblies at the superstructure and 40 percent of the subassemblies at the carrier were affected by the alterations due to new exhaust gas stages. That means that with each new exhaust gas stage a third of the complete crane had to be altered for maintaining the requested emission limit values.

Additionally at some crane models already with the Stage IV for engine and exhaust gas aftertreatment no possibility existed to keep the permissible total weight. To be allowed to further sell these crane models for weight reduction for the drive of the superstructure no separate diesel engine could be installed. For this single engine concept for this crane model no comparable technology was hitherto available in the market, so that an extensive and time consuming development activity was necessary which resulted in a complete new design of the carrier frame.

Each alteration measure at the AT-crane leads to purported test series, which should assure the functionality and safety of the machines. These tests and approvals are furthermore necessary to safeguard the maintaining of the legislation in force (e. g. machine Directive 2006/42/EG) as well as the homologation.

5.2 Chronological aspects of the conversions

The presented alterations must be carried out on the total multitude of different AT-cranes. Thereby always special solutions suitable for the particular crane model have to be developed. In addition with the different power classes installed on AT-cranes the engines differ significantly. Thus a generated solution for the integration of the exhaust gas aftertreatment and for the altered engine can’t be assigned to all crane models.

These extensive alterations for the conversion of AT-cranes to a new exhaust gas emission stage demand a certain time. In addition not all crane models offered by a manufacturer can be converted simultaneously. Due to the multifaceted limited resources like personnel and test spaces, the manufacturers can only convert their complete portfolio of cranes consecutively in a chronological order. In Figure 5-3 the chronological phase of the conversions of AT-cranes from Stage III A to III B and Stage III B to IV for the complete mobile crane industry are presented based on the data acquired from the manufacturers.

Due to the earlier implementation dates of the Stage III B and the Stage IV for engines within the power class 130 – 560 kW compared to the smaller power classes the presentation of the chronological impacts of the conversion of AT-cranes of this power class is taken as a reference. Furthermore on carriers of AT-cranes due to the necessary power for the traction drive always engines with more than 130 kW are installed. Also on the superstructures predominantly engines with more than 130 kW are installed, so that the implementation period for engines within the power range 130 – 560 kW is decisive for the chronological conversion of the AT-cranes.

In the time bar the respective actual valid emission stage for the years is colour marked (start Stage III B 01.01.2011 for 130–560 kW and start Stage IV 01.01.2014 for 130–560 kW). With the conversion to Stage III B the manufacturers have started in the middle of 2008 with app. five models. The further conversions of the crane models to Stage III B are started with chronological interval of three to four months. The last AT-cranes within the industry have been converted to Stage III B end of 2012. Based on 56 models, which in total the crane manufacturers have offered in the market with Stage III A, within a period of 4.5 years 42 models have been converted to Stage III B. The remaining models have for technical or commercial reasons either been postponed or phased out by the manufacturers. As the end of the conversion here the design completion incl. testing and the production run-up are presented, i. e. the start of the series production and thus also the availability of the models in the market. With the conclusion of the conversion of the AT-cranes to Stage III B in the market additionally six newly developed models with Stage III B were available.

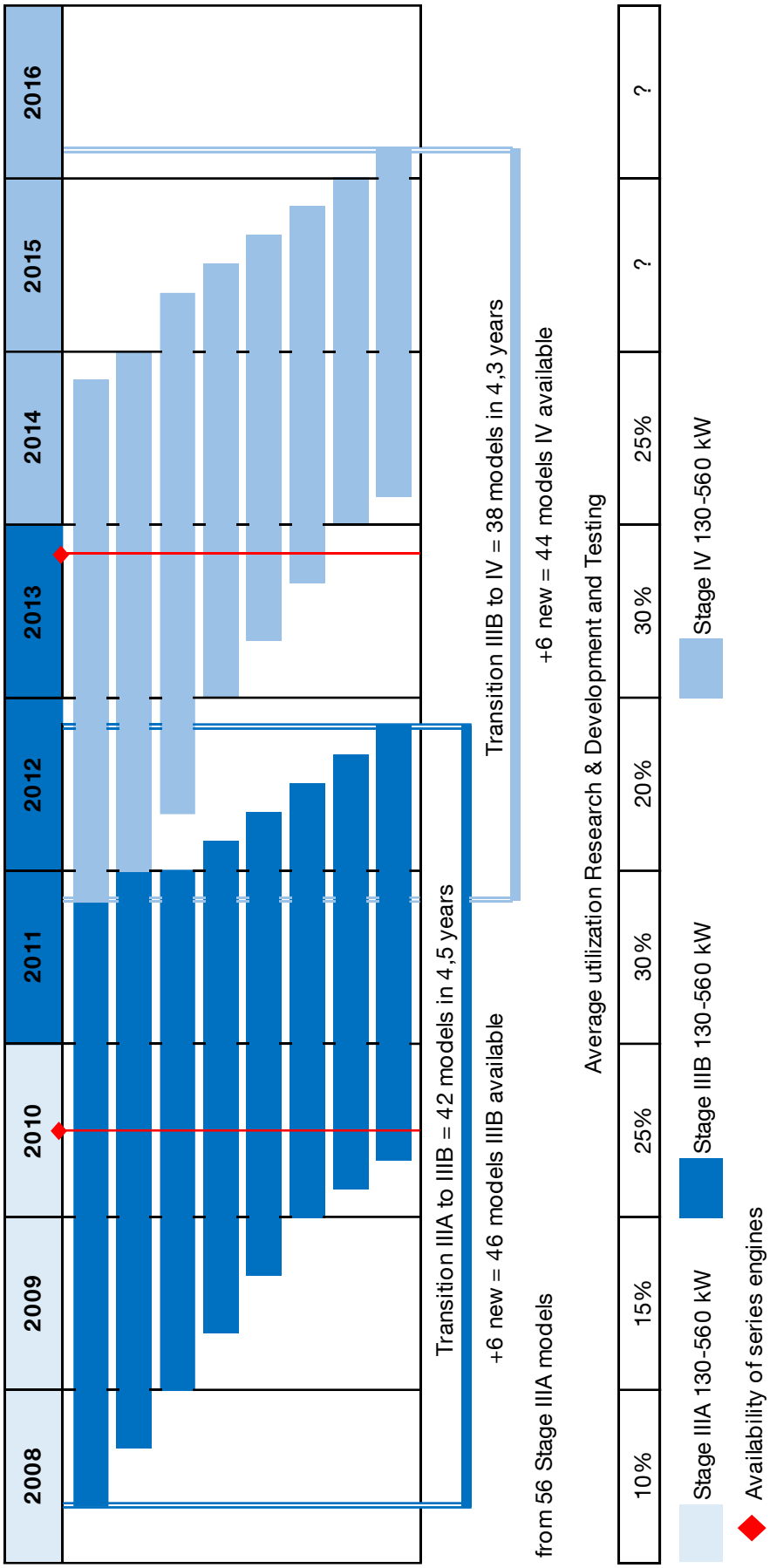

Figure 5-3: Chronological progress of the conversion phases of AT-cranes

With chronological overlap the manufacturers have started with the conversion to Stage IV end of 2011 / beginning of 2012. Based on the 42 AT-crane models of the Stage III B likewise due to reasons like technically impossible and / or not economical only 38 models have been converted to Stage IV. According to information of the manufacturers the last models will be finished beginning of 2016. So the manufacturers needed a total of 4.3 years to convert their complete product portfolio to the emission Stage IV. Added to these there are again six new AT-crane models, which have been developed with the emission Stage IV. In total the manufacturers have at the beginning of the conversion for their models more time needed for the design adaptions. As an average they needed per model more than two years for the conversion.

With the available resources thus it is possible for the manufacturers as an average to convert app. 40 crane models within 4.5 years. Thereby a smooth conversion without significant loss of turnover due to nonconverted and sold cranes could only be achieved with the transition period (cf. chapter 2.3). As can be seen in Figure 5-3 for the conversion to Stage III B, with the start of the Stage III B in the year 2011 only a third of the crane models at the end of 2011 had been adapted. Without the flexibility system and the transition engines the manufacturers according to their statements would not have been able to sell in the year 2011 two thirds and in the year 2012 one third of their products in the EU, because they had not been converted to the emission stage in force.

Decisive for the length of conversion and thus for the completion of the conversion phase of AT-cranes is the point in time when series engines, at which no alterations have to be performed, are available for the manufacturers. These dates can be seen in Figure 5-3 as milestones for the Stage III B and Stage IV engines. According to the statements of the manufacturers these dates were too late. Based on the experience for Stage III B and Stage IV completed engines are available only app. 12 to 6 months prior to the expiration of the old stage. After this milestone the manufacturers need depending on the conversion phase more than two years to adapt all of their models to the new engines and exhaust gas aftertreatment system.

Because also the engine manufacturers needed a certain time to develop and adapt engines and exhaust gas aftertreatment systems in the past it came to delays with the conversion of AT-cranes due to premature (preseries) engines (hard and software) by app. 25 percent. Thereby the crane manufacturers are regarding the time depending for the conversion on the production of the engines as the machines must be newly adapted to the engines. If due to technical problems the shape, the position of certain connections at the engine or the exhaust gas aftertreatment system change the manufacturers must again adapt their machines accordingly.

For the conversion phase from Stage III A to III B and Stage III B to IV a large amount of work accrued, especially in the departments for design and development as well as in the test department. Although also a further amount of work arose, i. g. in the production due to employee training or in the purchasing and logistic departments due to components newly to be procured and administratively controlled, the core resources design / development generated a bottleneck. The utilisation of the work capacities of these core resources for the conversion of AT-cranes is presented in Figure 5-3 on annual basis for all four mobile crane manufacturers. To the stated utilisation must be added orders placed with external engineering companies for the conversion, as without this external support the conversion of the AT-cranes in this time frame would not have been feasible. However only a certain part of the tasks can be outsourced. Special developments works can in parts only be performed by own employees. From these so called key departments in general the further proceeding for the conversion is contingent. So certain specialist pools of the departments of the companies were during the conversion phase utilised up to 80 percent only for the conversions.

To be added to the stated utilisation in the department development / design and the test department are the demands of work capacity at the manufacturers due to the conversion of further mobile crane types over and above the AT-cranes. So the sum of the utilisation of the core departments due to the conversion of all crane types is much higher.

5.3 Economical consequences of the conversions

Form the performed amount of work in the department design / development and in the test department for the conversion of AT-cranes from the Stage III A to III B and to IV monetary expenditures for the manufacturer resulted, which are listed Figure 5-4 Beside the costs for the development further costs for each manufacturer arise for homologation / approval, costs for quality problems, which are connected to the new engine systems as well as storage costs for transition engines. For this cost compilation only costs were considered which arise directly from the conversion of the AT-cranes to the new emission stage. The procedure for the cost finding based on the manufacture information is described in chapter 3.3.

In total the costs for the mobile crane industry for the conversion of AT-cranes from the emission stage III A to III B amounted to 31.80 million €. The conversion from the emission Stage III B to IV up to the end of the conversion phase will amount to 50.83 million € according to the estimates of the manufacturers. To this has to be added for both conversions together the costs for storing and the capital commitment for engines of app. 4.53 million € as well as the costs for rectifying of quality problems,

like the exchange of preseries engines or the retrofitting of heatable urea lines, in the amount of 7.38 million €.

	Stage IIIA to IIIB	Stage IIIB to IV
Research & Development and Testing incl. External contractors **Production ramp-up** **Homologation**	**31,80 m€**	**50,83 m€**
Inventory costs	**4,53 m€**	
Quality issues related to the engine	**7,38 m€**	
	37,76 m€	**56,79 m€**

Figure 5-4: Economical consequences for the mobile crane industry due to the conversion of AT-cranes to new exhaust gas stage

Further expenditures and thus corresponding costs for the implementation of new emission stages at mobile cranes have not are considered. Though e. g. the administrative effort for purchasing, for the logistic and the production control is significantly increased starting with the implementation of Stage III B. Crucial is the higher number of engine versions for different markets due to different regulations for permissible emissions. Figure 5-5 clarifies the increased complexity for the control and storage of several different engines from the year 2010 in comparison to the previous globally deployable engine of the Stage III A.

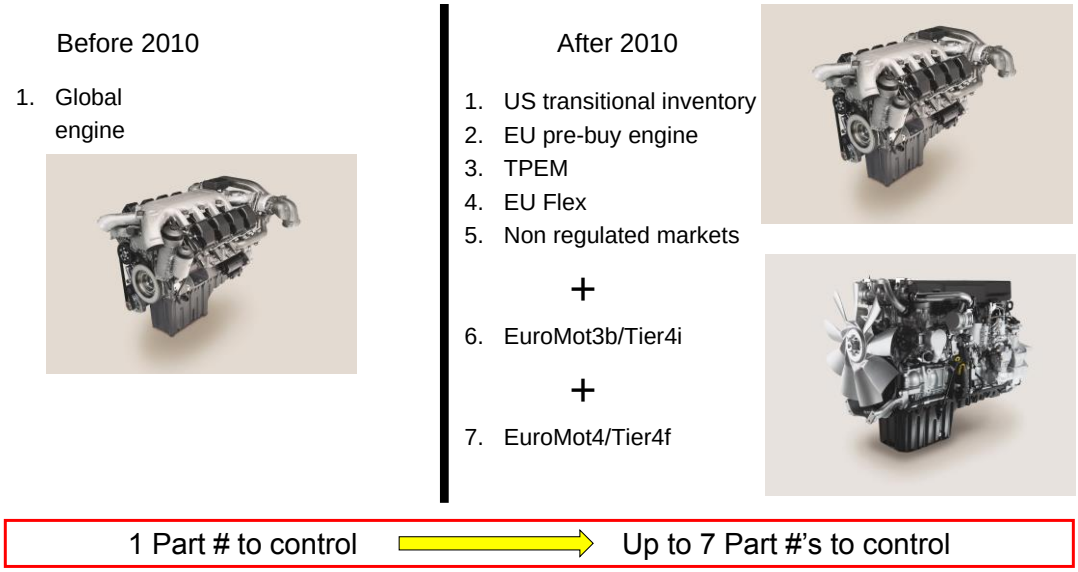

Figure 5-5: From global engine to the complex control and storage of different engines from 2010

Reason for the increased number of engine versions held readily available is the requirements of the markets. The European crane manufacturers must be able to offer modified engines and machines for markets, where different regulations resp. emission legislations and technical barriers exist (cf. 2.3.2.), to prevent the loss of these markets and turnovers. This leads from the economical view to reduced economies of scale and increasing costs for the machine manufacturers [SWD (2014) 281].

The competition disadvantages of the cost intensive version plurality of the European mobile crane manufacturers exist not for manufacturers from none or little regulated markets, which presently don't participate in the European market. Additionally these manufacturers don't have to bear additional costs for the implementation of new emission stages in the EU. Hence they can offer competitively on the world market and put pressure on the European manufacturers. This would have significant effects for the European mobile crane manufacturers as the present export share of AT-cranes lies at 60 percent.

Furthermore the European mobile crane manufacturers due to the constant high additional demands on the development departments for the conversion to new emission stages since 2008 have no more available the necessary time to develop to a higher extent new crane models, lower the costs and to generate innovations. This time the manufacturers outside the EU have at their disposal so that they can focus on new developments. Thus the skills for innovations and competition of the European mobile crane industry suffer.

6 Projection for the conversion Stage IV to Stage V

6.1 Prognosis for technical and chronological aspects of a conversion to Stage V

Below the necessary alterations resp. extensions at the engine and its exhaust gas aftertreatment system for maintaining of the emission limit values of the projected Stage V on the basis of the data acquired from the engine suppliers are described. Based on this (as also on the statements of the own engine suppliers) the mobile crane manufacturers have derived by means of installation space research the implications of these adaptions to their AT-cranes as well as have estimated the necessary time requirement.

6.1.1 Adaption at engine and exhaust gas aftertreatment system

After the publication of the first proposal for the emission Stage V in autumn 2014 [COM (2014) 581] the engine manufacturers are still in the concept phase. Final solutions are still not available. An exact delivery date for series engines in all power classes for AT-cranes can‘t at this time be expressed, as the planning of the engine manufacturers still is not concluded. The actual planning envisages the start of the series production for middle of 2018, so that series engines, at which no alteration anymore are carried out, presumably at this point in time are available for the manufacturers. The following technical alterations are intended:

- The previously existing concepts include for all engine manufacturers the use of a particle filter for the reduction of the particle emission. The engine manufacturers have in different ways already experience with this technology.
- With all engine manufacturers the basic engine presumably remains the same, changes of the engine block like the conversion from V to inline engines connected with the implementation of the Stage V are not planned.
- The increase of the mass of the engine and the exhaust gas aftertreatment system is for all manufacturers in the range of up to 100 kg.
- The volume of the exhaust gas aftertreatment system increases by app. 20 % especially by a length increase of the system.
- An increased consumption of the urea dilution AdBlue is expected. This leads to the fact that the respective tank has to be enlarged up to 50 %.

6.1.2 Consequences of the engine adaption for the all-terrain crane

The following information is preliminary and will still be changed with alterations / concretion of the engine system. The necessity for adaptions at the different AT-crane models is very high and depending on the available installation space proportions, so that for each crane model, as also in the past, diverse adaptions will unfold.

Design alterations at the AT-crane superstructure due to new engine systems of Stage V in comparison to Stage IV

Starting base for the presentation of the design alterations at the superstructure is the emission Stage IV which came into force in the beginning of 2014. Figure 6-1 shows the position of the drive train, the most important components of the exhaust gas aftertreatment system and provides a general insight in the installation spaces at the superstructure.

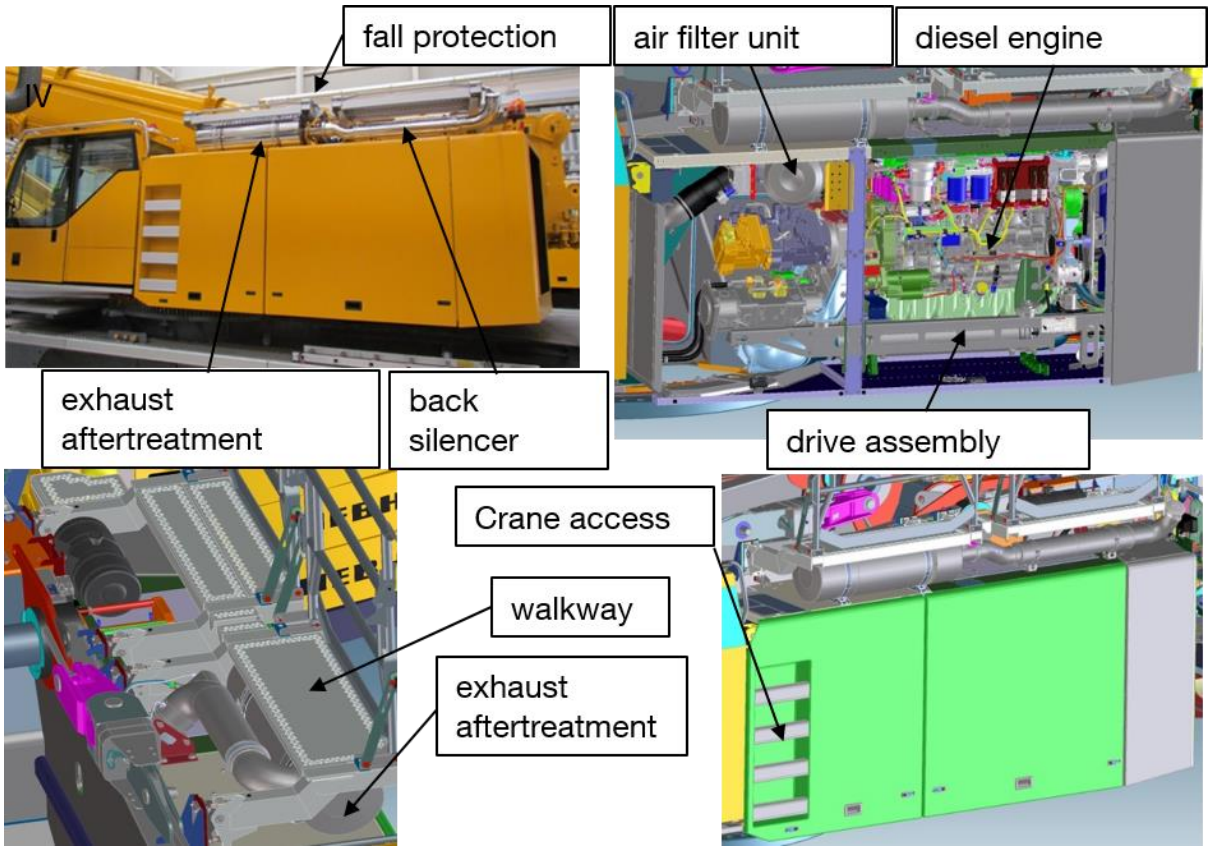

Figure 6-1: Setup superstructure of the emission Stage IV as starting situation

At this crane the engine is placed at the left side behind the cab and the exhaust gas aftertreatment system is positioned on the engine housing. Above the exhaust gas aftertreatment system a walkway with railing is installed, which must be folded in due to the permissible vehicle height of 4 m for road transportation. In Figure 6-2 a preliminary installation study of the exhaust gas aftertreatment system for Stage V is presented.

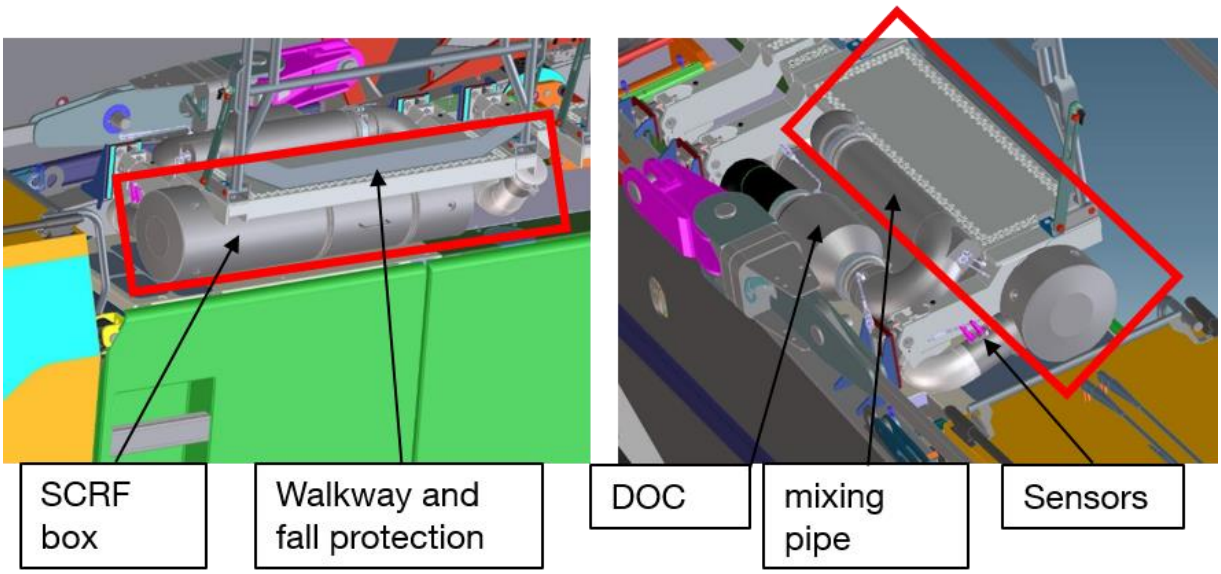

Figure 6-2: Installation study for the exhaust gas aftertreatment system Stage V

In this first installation study already similar problems as during the implementation of the previous emission stage can be detected. Due to the additional components of the exhaust gas aftertreatment system in the area marked in red it will come to a collision with the walkway and the fall-down protection. Additionally by installation of the new system the permissible total height of four meter will be exceeded, which is shown in Figure 6-3 in the left picture in the side view.

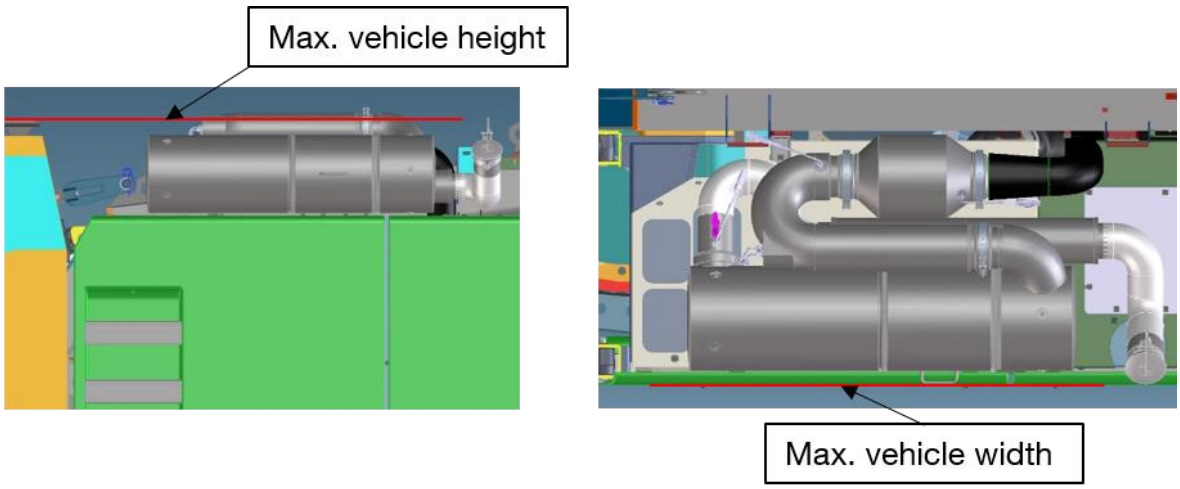

Figure 6-3: Installation situation of the AGN Stage V at the superstructure

The alteration at the exhaust gas aftertreatment system requires due to the demonstrated collision and the transgression of the permissible dimensions again extensive design alterations at the superstructure. It is not possible to integrate the new exhaust gas aftertreatment system into the existing superstructure so that new concepts for this must be developed.

Design alterations at AT-crane carriers with four axles due to new engine systems Stage V in comparison to Stage IV

Beside the installation into the superstructure at two-engine cranes the new exhaust gas aftertreatment system also have to be integrated into the carrier. As explained in chapter 6.1.1 it is assumed that the basic engine in comparison to the Stage IV is not changed but only the components of the exhaust gas aftertreatment systems will be adapted. In Figure 6-4 is the comparison of the installation situation of the engine and the exhaust gas aftertreatment system in the carrier of a four-axle AT-crane for the Stage IV and the Stage V shown. The presented components are at Stage IV (pictured in red) still to be considered as placeholder as no final design data are available. Overall it can well be seen in both cases the exact integration of the engine and the gearbox in the frame (see Annex C.3).

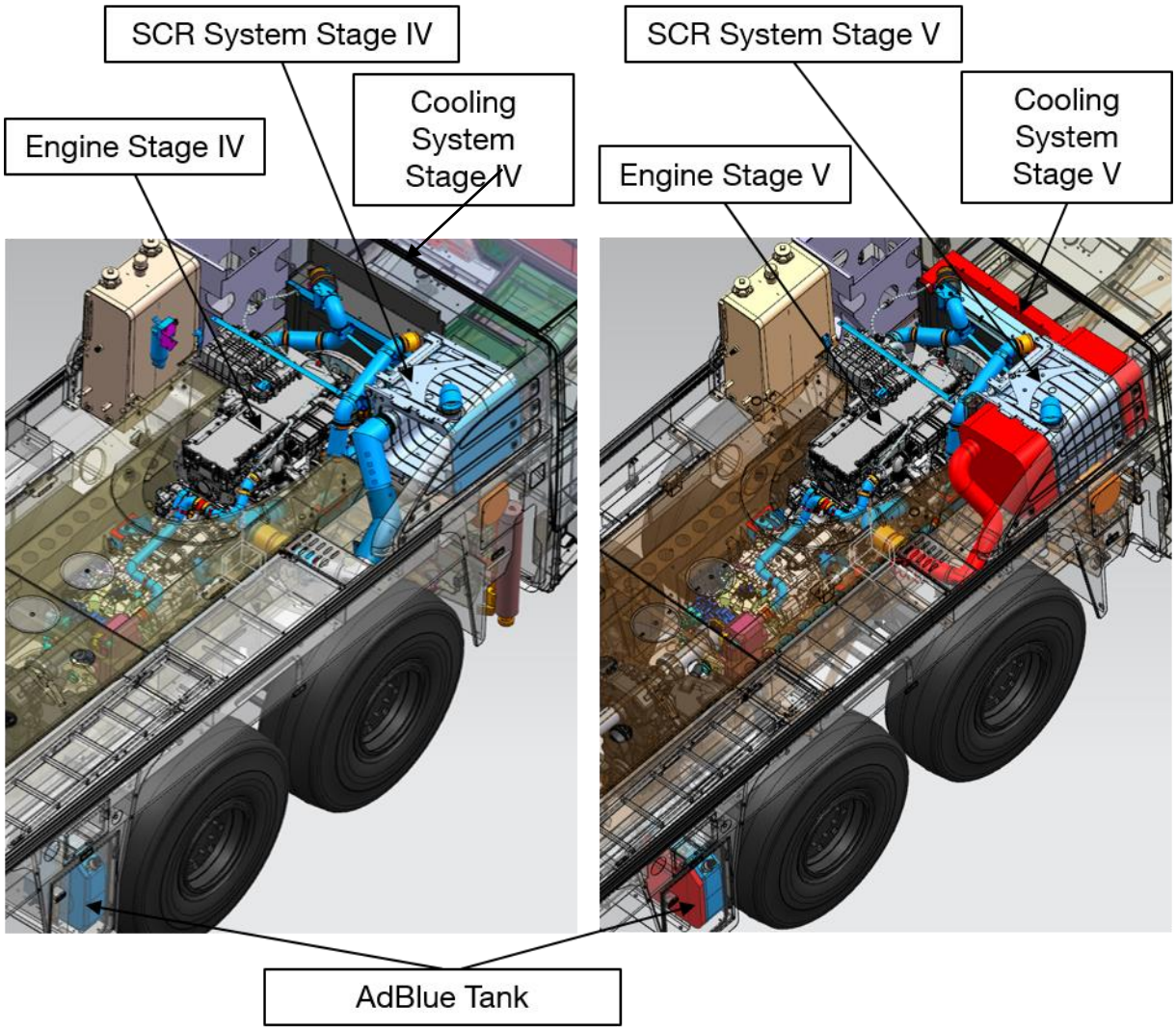

Figure 6-4: Comparison of the engine installation situation of the Stage IV (left) and the Stage V (right) at the carrier of an AT-crane

By the larger exhaust gas aftertreatment system in comparison to Stage IV the piping starting at the engine must be altered to match the displaced connection. Beside that alterations at the cooling system will be required which can be traced to alteration of the AGR-system. Additionally the AdBlue tank, which is located at this crane between the axles, will be once more larger. Depending on the additional mass of the new resp. altered components again also an alteration of the counterweight and possibly further components is necessary to be able to keep the permissible axle loads.

Design alterations at AT-crane carrier with five axles due to new engine systems of the Stage V in comparison to Stage IV

In the framework of this chapter based on the presently valid exhaust gas emission Stage IV the projection of the conversion of five-axle carriers to the Stage V is performed. In Figure 6-5 the installation situation of the exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV at the carrier is shown as the starting point.

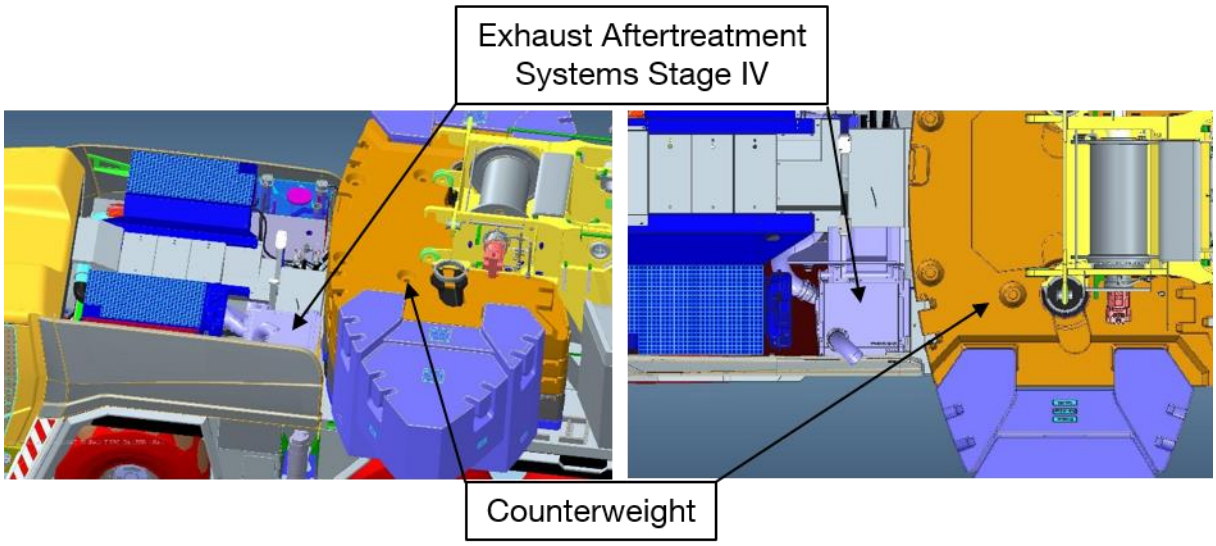

Figure 6-5: Installation situation of the AGN Stage IV in the carrier

Well visible is the general tight installation situation of the components. The position of the individual subassemblies at the carrier is especially limited by the vehicle dimensions and the slewing area of the counterweight, so that also here only a small distance to the exhaust gas aftertreatment system is possible. By the implementation of the Stage V however significant alterations at the exhaust gas aftertreatment system unfold. In Figure 6-6 for this the comparison of the exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV (drawn in blue) with the first draft for exhaust gas aftertreatment system of the Stage V (drawn in green) in the front view is shown.

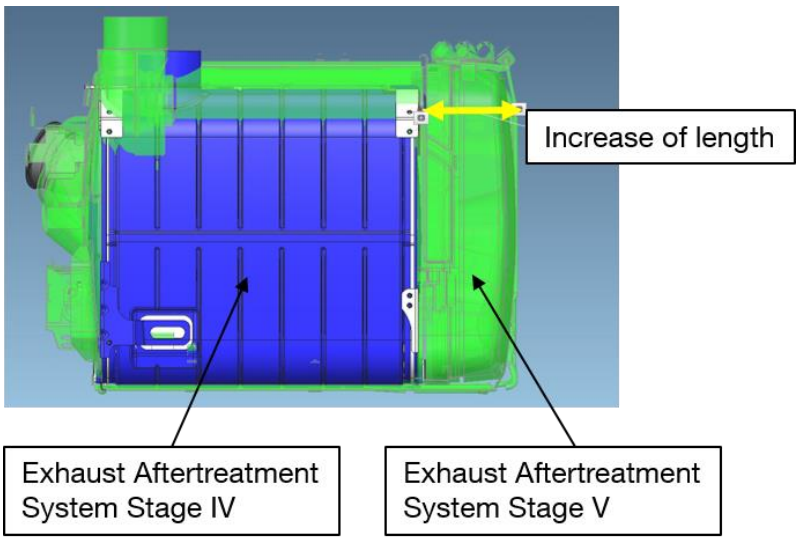

Figure 6-6: Comparison between the AGN Stage IV and the Stage V for the installation in the carrier

Beside the length increase at the new system in this Figure also the changed position of the connection is visible. This leads to the fact that the piping coming from the engine for the Stage V must be redesigned and adapted. In the integration of the first draft of the new system is shown on the five-axle carrier.

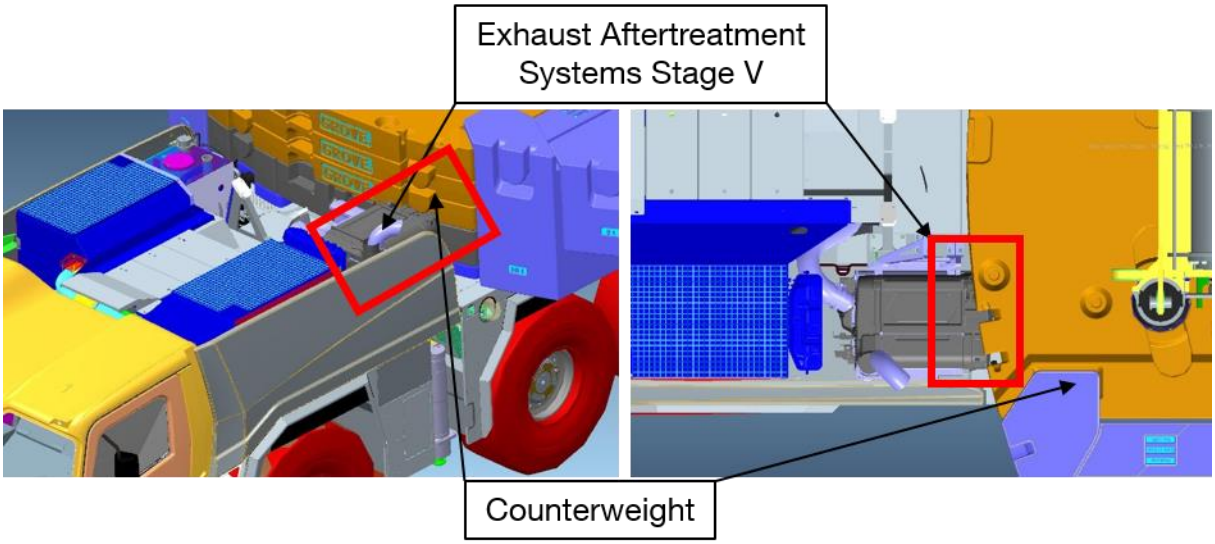

Figure 6-7: Setup carrier of the emission stage IV as starting situation

Hereby it is problematic, that the exhaust gas aftertreatment system due to the length increase is positioned in the slewing area of the counterweight and collides with it (area marked in red). A shifting forward is due to the connection to the exhaust gas tube of the engine and the cooling system positioned behind hardly feasible. Thus the alteration of the exhaust gas aftertreatment again requires an extensive alteration for the carrier design.

Conclusion

Due to the alteration of the exhaust gas aftertreatment system at the transition to Stage V (mainly increase of the volume resp. the length) for its installation again a design adaption at the crane is necessary as demonstrated as an example at the superstructure and the carrier. These adaptions result mainly from the limitation of the total height and width for AT-cranes, which may not be exceeded for the approval for public roads as well as from collisions with existing subassemblies which the new systems cause.

6.1.3 Prognosis of chronological aspects for the implementation of the Stage V at all-terrain cranes

Based on this first installation space research the manufacturers are again confronted for some AT-crane models with problems, which are technically difficult to solve. As already with the previous conversions the manufacturers can't convert for technical reasons some of the crane models to the projected Stage V without extensive new designs of the superstructure and carrier becoming necessary. The extent for the adaption of all AT-crane models is estimated similar to the conversion from Stage III A to III B, because with Stage V in fact an additional new main component (DPF) accrues. The basic engine remains. Due to the already now by the SCR-system restricted installation space in the AT-crane it becomes constantly more difficult for the manufacturer to integrate new components and hereby not to exceed the permissible weights and axle loads.

The mobile crane manufacturers assume that they need three years from the availability of the series engines end of 2018 to convert their AT-cranes to the new emission Stage V.

Based on the projected transition period in the proposal of the EK [SWD (2014) 281] for the implementation of the Stage V (cf. Figure 2-4) of one year it is not possible for the manufacturers to have converted their complete product portfolio of actual 38 AT-crane models by the due date 01.01.2020. Also the presentation of the chronological aspects in the impact rating (cf. chapter 5.2) has shown, that the manufacturers needed for the conversion from Stage III A to III B as well as for the conversion from the Stage III B to IV more than two years from availability of the series engines (cf. Figure 5-3).

If the transition time of one year for the conversion of the machines remains, the manufacturers state, that only one third can be converted from beginning of Stage V in the year 2019 and in the second and third year each again one third can be adapted to the new emission stage.

6.2 Prognosis for economical consequences for the implementation of the Stage V at all-terrain cranes

As the design effort as also the necessary time for the adaption at the AT-crane to the new Stage V are estimated as high as for the conversion from Stage III A to III B, the manufacturers expect the cost burden to be similar (cf. chapter 5.3). However based on the chronological prognosis with a transition time of one year the manufacturers will not be in a position to convert two thirds of their AT-cranes and thus may not sell them in the EU. Due to similar boundary conditions and restrictions this statement can be essentially related to all mobile crane types. With an export share out of the EU of 60 percent 40 percent of the mobile cranes of the European manufacturers are sold within Europe. Two thirds of these turnovers in Europe would be lost in the first year after the start of the Stage V and one third in the second year. As a sum this corresponds to a loss of turnover for the complete European mobile crane industry of more than 1 billion €. These missing turnovers would lead to a financial weakening of the companies and presumably also to an analog reduction of workplaces.

Furthermore with the new Stage V the number of derivates for the cranes would further increase. As presently no harmonising with the USA is planned, the crane manufacturers would have to offer three different versions of their crane models:

- Stage V in the European Union
- Tier 4 final in the USA (+ regulated markets)
- Stage III A for nonregulated markets

The additional costs for the conversion and version diversity as well as the lost turnovers in the EU market would weaken the European manufacturers financially and with their competitiveness with international suppliers. This would cause non-European suppliers to enter the nonregulated markets or existing supplier to further strengthen their position. As a result from this the market position of the European manufacturers would be endangered.

These effects could be intensified by the lack of innovative capacity of the European mobile crane manufacturers, as they still to a large extent have to invest development resources in their conversion of mobile cranes to new emission stages. The manufacturers would similar to the two previous conversions (cf. Figure 5-3), begin with the development and design work for the conversion to stage V of their cranes again two to three years prior to the start of the new emission stage. This would have the consequence that for all manufactures parts of their development capacities since the years 2008 to 2022 continuously would be tied to the conversion of new emission stages and lacking for innovations.

As the manufacturers, following the chronological prognosis, within the EU may sell only one third in the first year and two thirds in the second year after implementation of the Stage V of their AT-cranes, accordingly the users could only with the available AT-cranes replace their inventory of old machines to a third in the first year and to two thirds in the second year. This would result in older machines with worse emission limit values being further operated in the EU and not as usual migrate to the rest of the world. The implication arising from this for the environment and also for the health of the society is contemplated in the chapters 6.4 and 6.5. For this serve the scenarios for varied transition periods established in the following chapter.

6.3 Scenario generating for the conversion to Stage V

As a basis for the presentation of the implication of the implementation of the exhaust gas emission stage V at AT-cranes regarding the arising costs and the improvement of the pollutant emission below four different scenarios are generated and compared with each other. The scenarios differ mainly with regard to the time period in which the conversion to Stage V must be performed. For the chronological contemplation the key data of the implementation for the power range of engines with 130 – 560kW are assumed, as this power range has the highest share in the AT-cranes.

Scenario 1

The scenario 1 is considered also as the Business-As-Usual-Scenario (BAU), in which the Stage V is not implemented at all. This means that further after the year 2020 engines and cranes with the exhaust gas emission stage IV are produced and are allowed to be sold in the European Union. In Figure 6-8 the chronological process for the years 2018 to 2022 is schematically presented.

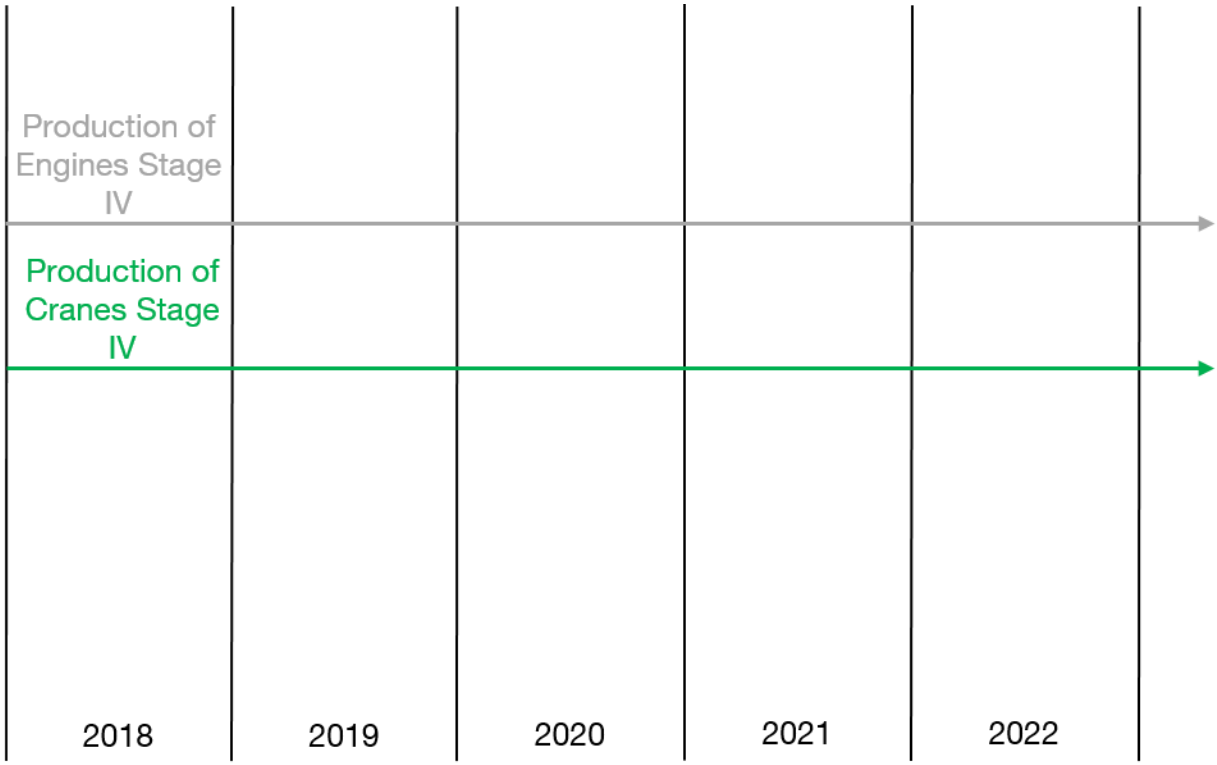

Figure 6-8: Chronological process scenario 1

This scenario serves mainly for the comparison, which implications the implementation of the Stage V have to the particle and nitrogen oxide emission from the diesel engines. The previously generated improvements by the implementation of the exhaust gas emission stages up to Stage IV can be taken from the exhaust gas emission inventory in chapter 4. At this place this scenario serves only as a reference for the implementation of the Stage V.

Scenario 2

The scenario 2 differs from the scenario 1 by the implementation of the Stage V. This scenario is started from the ideal conception that the conversion of all AT-cranes can be performed within one year. Hereby it is presumed that the serial ready engines are available for the AT-cranes in the year 2018 and the year 2019 will be used for the design alteration of the cranes. From the year 2020 than only machines with the exhaust gas emission stage V are sold in the European Union. In Figure 6-9 the chronological process for the scenario 2 is presented.

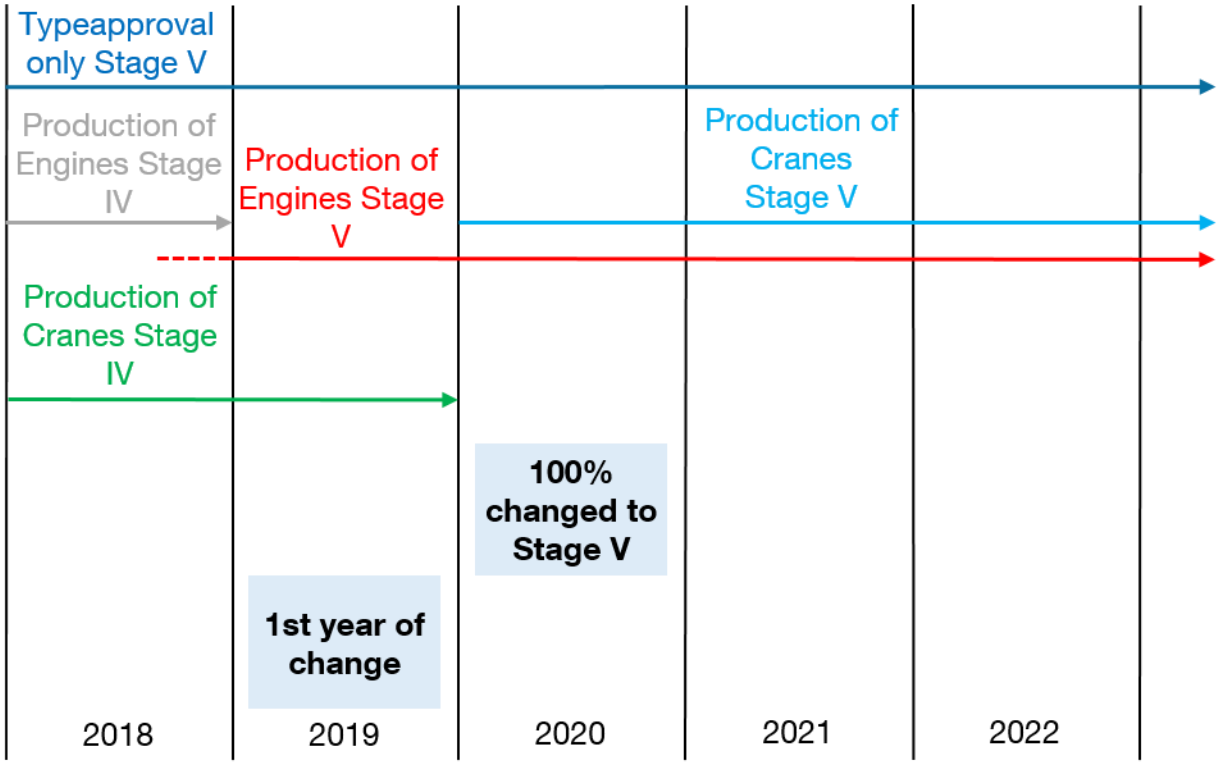

Figure 6-9: Chronological process scenario 2

From beginning of 2018 the type approval is possible only for engines of the exhaust gas emission stage V, engines with the expiring Stage IV however may still be produced until the end of the year 2018. For cranes on which these engines are installed this final point is shifted by a year. Cranes may still be produced with the Stage IV until end of the year 2019. Simultaneously from the year 2019 only engines of the Stage V are produced and the cranes converted. Based on the experience from the last conversion to the emission stages III B and IV this however will not be considered by the crane manufacturers as feasible, as due to the extensive alterations at the machines within one year only app. one third of the product portfolio can be converted.

Scenario 3

In the definition of scenario 3 the experience of the crane manufacturers from the Stage III B and IV have been taken into account and investigated, which implications a transition period of 3 years for the conversion indicates. The borderous conditions regarding the type approval and the delivery dates for new engines with the exhaust gas emission stage V are not changed in comparison to the scenario 3. Figure 6-10 indicates schematically the chronological process for the implementation of the Stage V for the scenario 3.

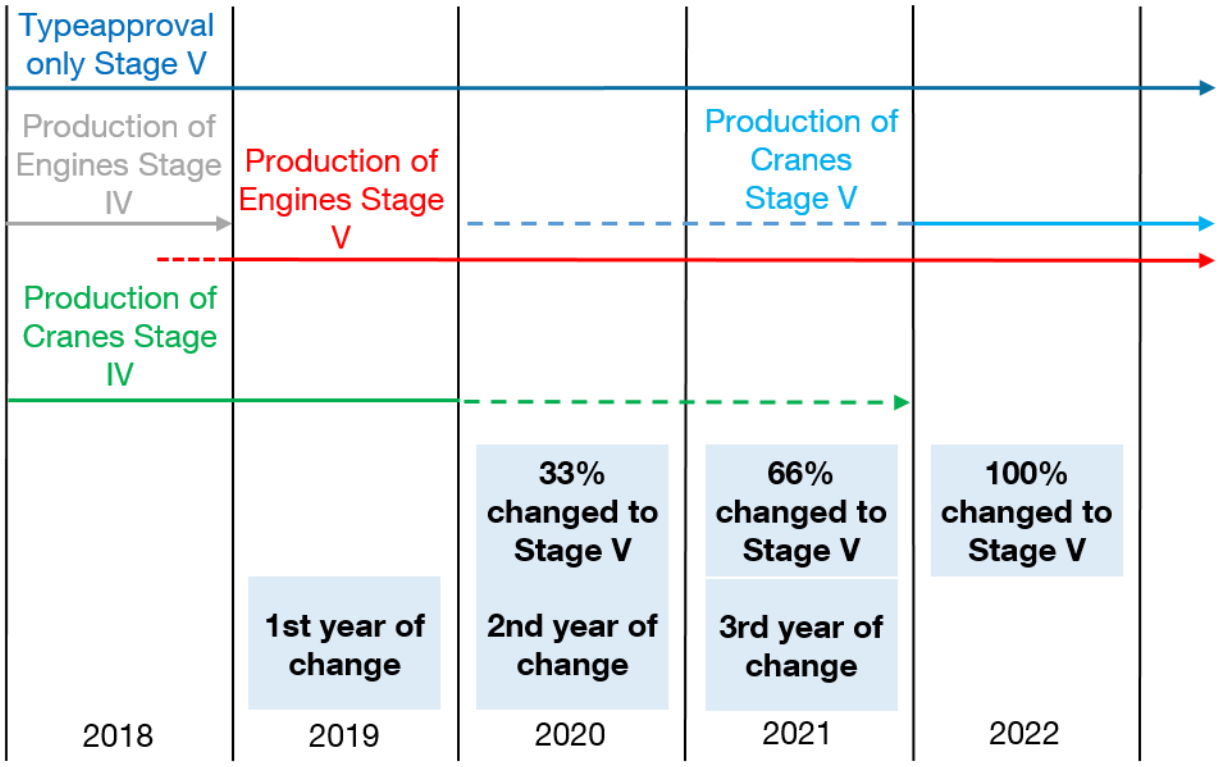

Figure 6-10: Chronological process scenario 3

The decisive difference to scenario 2 is related to the transition period for putting of the cranes into the market with the old emission Stage IV. In this scenario the fact emanated, that within one year only a third of the product portfolio of the crane manufacturers can be converted to the new stage. That means that in the year 2019 the first third of the AT-crane models can be converted and sold in the year 2020. The remaining models will be further delivered with the Stage IV. In the year 2020 the second third of the portfolio is converted so that in the year 2021 a total of two thirds of the models with Stage V and one third still with Stage IV are placed in the market. In the year 2021 than the last third of the cranes is converted so that from the year 2022 only cranes with the exhaust gas emission stage V are delivered in the European Union.

Scenario 4

The scenario 4 defines the intersecting set from the scenarios 2 and 3. Hereby it is assumed that the conversion must be finalised within one year, the real conversion however will be three years. In Figure 6-11 the chronological process of the scenario 4 is schematically indicated.

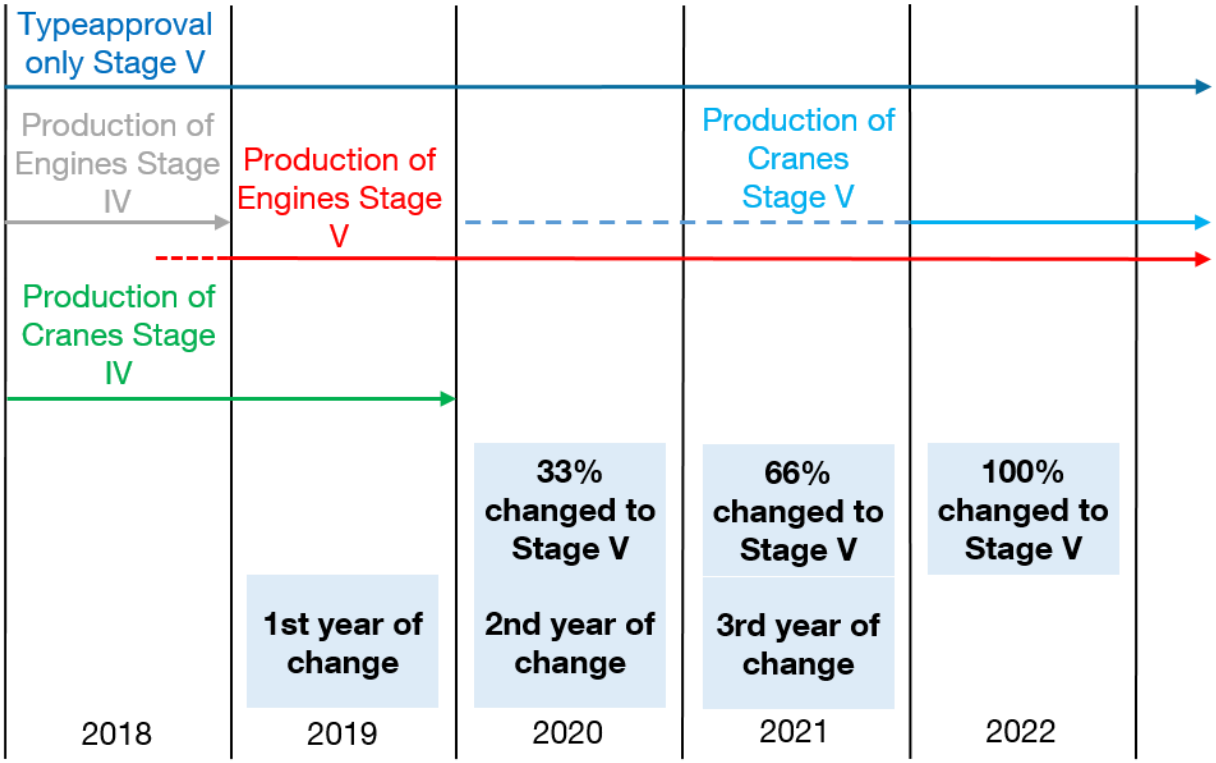

Figure 6-11: Chronological process scenario 4

As implications arises, that in the year 2020 only one third of the AT-crane models are converted to Stage V and thus may be brought into circulation in Europe. The remaining crane models, which could be sold in this year, are not available due to the absent conversion. In the year 2020 the second third of the models can be altered, so that in the year 2021 overall only two thirds of the product portfolio are available. From the year 2022 all crane models are converted and again available in full number of units. The nonavailability of cranes in the years 2020 and 2021 has a significant implication to the emission of particles and nitrogen oxide as well as on the turnover of the crane manufacturers. Below the scenarios defined in this chapter regarding the particle and nitrogen oxide emission are compared with each other. The target is hereby to show, which implications the determination of the transition period has on the emissions, in which still machines with the Stage IV after implementation of the Stage V can be brought into circulation.

6.4 Trend-Impact Analysis for the determination of the exhaust gas emission inventory and determination of the consequences for the environment for the generated scenarios

In this chapter the scenarios introduced in chapter 6.3 regarding the implications on the emission of particle and nitrogen oxide are examined. Starting point for this comparison is the year 2020, whereas the examination period extends to the year 2050. For the scenarios 1 to 3 no changes in the population structure of the machines occur, as all models are available and thus all cranes can be replaced. Because at scenario 4 in the years 2020 and 2021 not all crane models can be sold in full numbers, as they don't comply with alterations of the actual exhaust gas emission stage, also here changings in the population structure unfold. In Figure 6-12 the age structure in the year 2025 for the scenario 4 compared to the scenario 3 is shown.

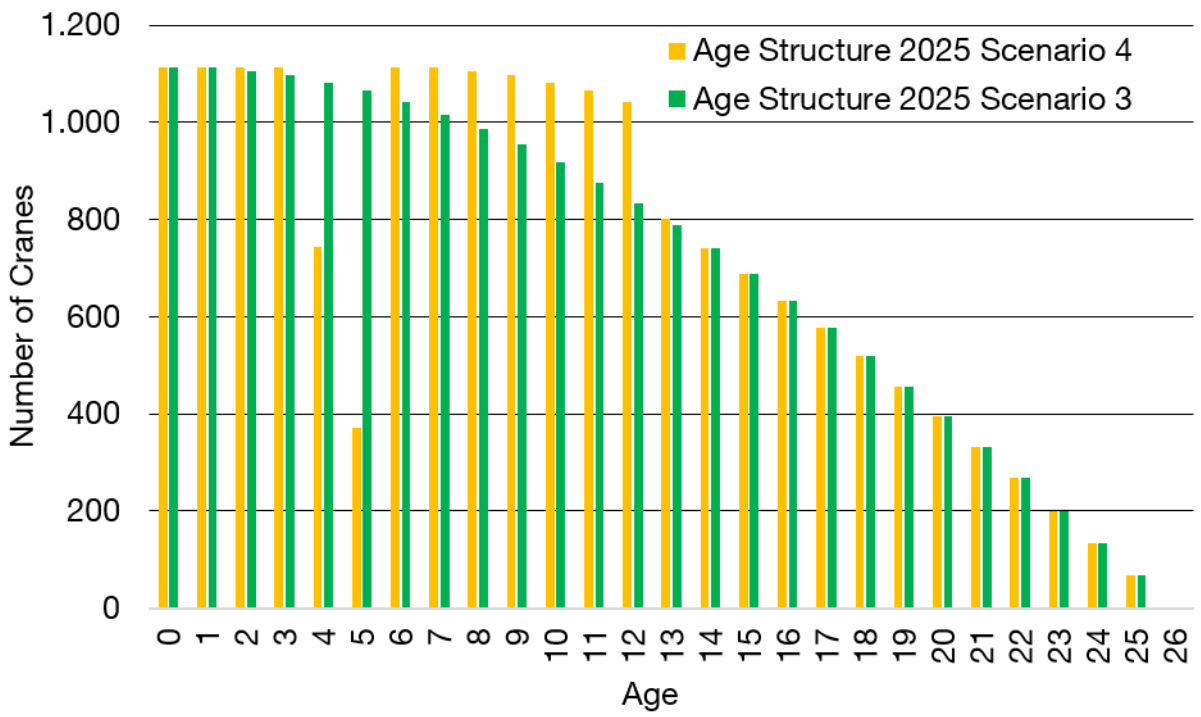

Figure 6-12: Comparison of the age structure of scenario 3 and scenario 4 in the year 2025

Clearly detectable is the nonavailabilty of cranes from the year 2020 and 2021, which could not be converted to the latest exhaust gas emission stage V. The approach for the exchange of old units is so selected, that with the available cranes in the year 2020 and 2021 always the oldest machines are exchanged as far as the available number allows this. This however leads within the defined scenario to the situation, that older cranes, which normally would be replaced by newer models, can't be exchanged and thus are still left in the population for some years. These

cranes don't meet the latest emission standards, which has an overall negative impact on the emission of particles and nitrogen oxide. The age structure on which the other scenarios base will due to the incremental exchange of units only again be reached in the year 2041.

6.4.1 Nitrogen oxide emission of all-terrain cranes of the scenarios in comparison

The impacts regarding the nitrogen oxide emission are presented in Figure 6-13 and for the particle emission in Figure 6-14 as a comparison of the scenarios.

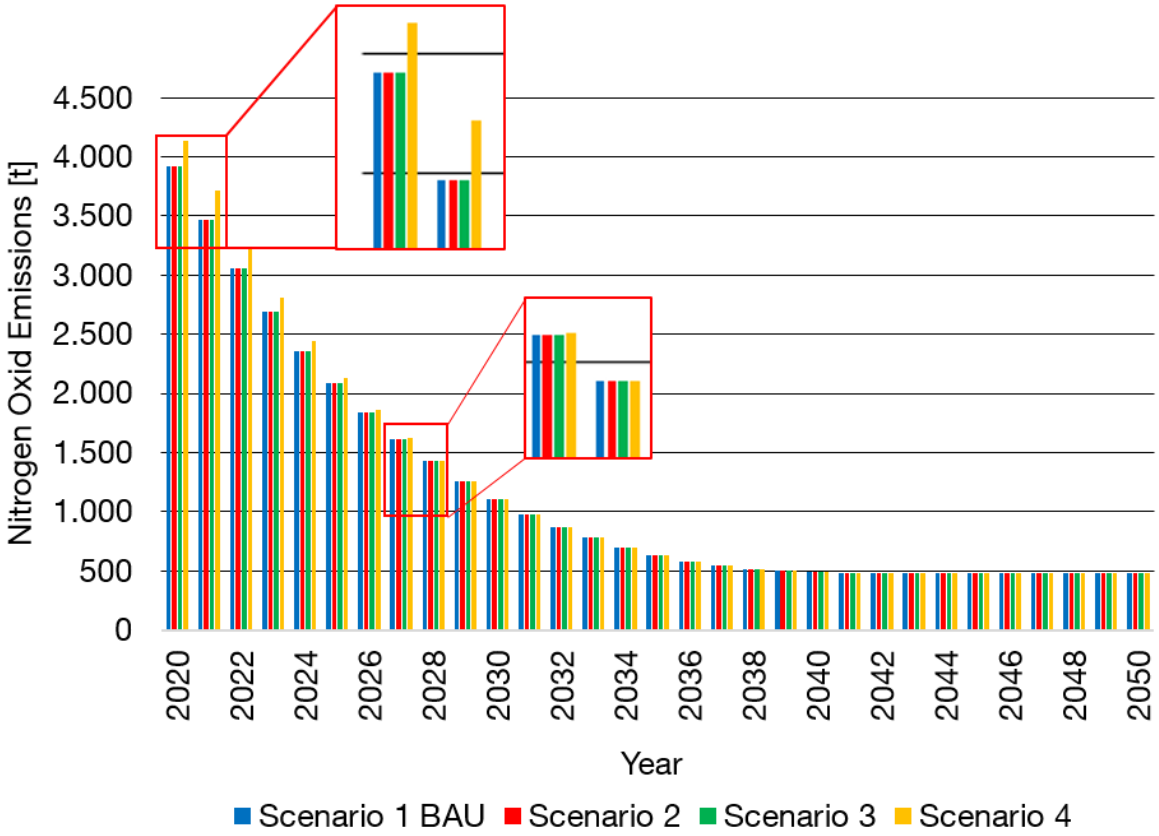

Figure 6-13: Development of the nitrogen oxide emission during the period under review from 2020 to 2050 in the European Union

In this presentation it is clearly visible, that in the projected time frame from 2020 to the year 2050 no improvements materialise by implementation of the Stage V regarding the nitrogen oxide emission, as the limit values compared to the Stage IV are not changed. This leads to the situation that the scenarios 1 to 3 don't differ, as they all base on the same limit values. For the scenario 4 ensues in the first years after implementation of the Stage V however a higher emission of nitrogen oxides, because in comparison to the other scenarios old machines must remain longer in the population as they can't be replaced by newer machines in the years 2020 and 2021.

6.4.2 Particle emissions of all-terrain cranes of the scenarios in comparison

In the field of the particle emission a somewhat more differentiated picture unfolds, as by implementation of the Stage V the limit value for particle emission compared to Stage IV again is intensified. In Figure 6-14 the comparison of the scenarios regarding the particle emission during the period of review of the years 2020 to 2050 is presented.

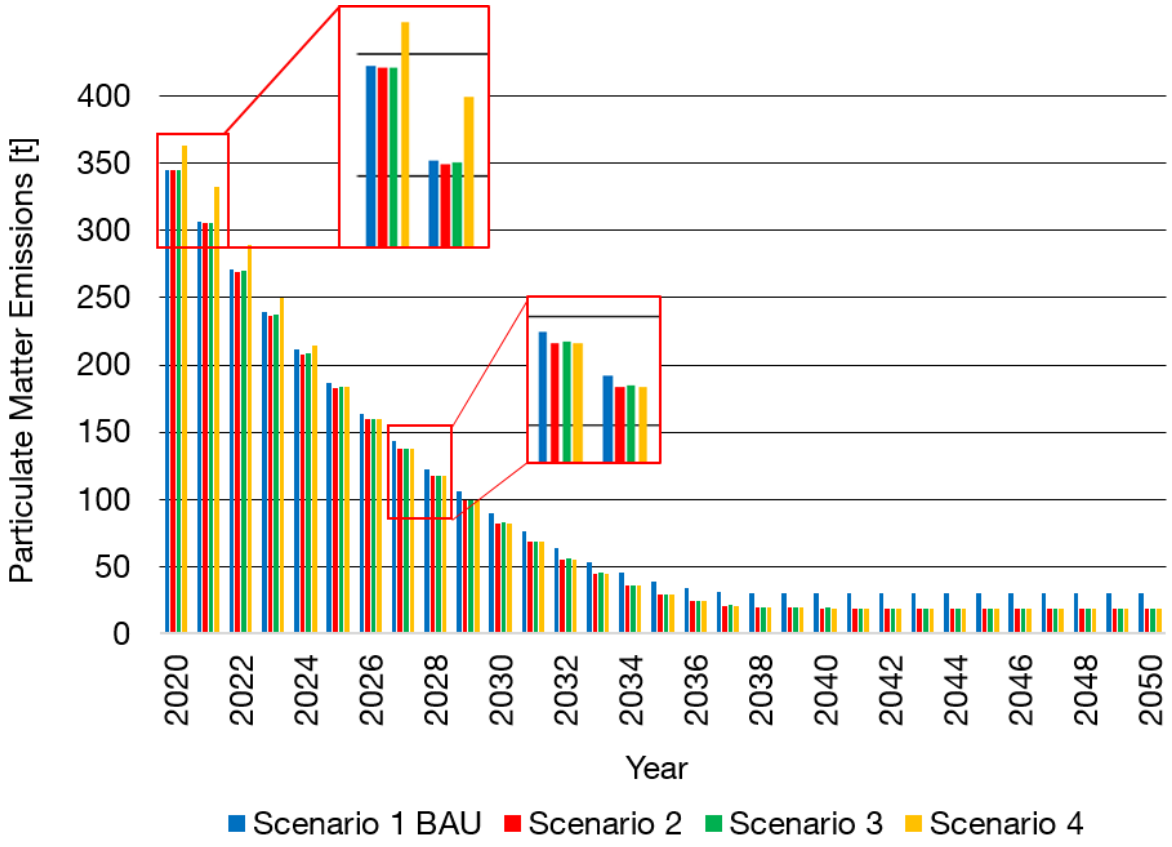

Figure 6-14: Development of the particle emission during the period of review from 2020 to 2050 in the European Union

In this Figure the blue bars mark the scenario 1 – Business as Usual (BAU)) – in which it was completely abstained from implementing of the Stage V for AT-cranes. This scenario serves below as a reference parameter for the contemplation of the scenarios 2 to 4 with regard to the development of the particle emissions. In scenario 2 it is emanated that the implementation of the Stage V can be mastered by the manufacturers of AT-cranes within one year. This leads to the result that the emissions by increasing penetration of the populations with machines of the Stage V slowly drop below the scenario 1. From the year 2045 no further emission reduction materialise, as from this point in time all old machines with worse emission stage are replaced. From the experience regarding the time demand for the latest conversions to the Stage III B and IV (see chapter 5.2) this scenario is viewed by the crane manufacturers as not attainable. Thus in scenario 3 it is examined, which impacts are cre-

ated by the extension of the transition period to three years regarding the particle emission. Overall a similar picture to scenario 2 emerges. The emissions drop slowly below the level of scenario 1, a significant difference, whether the manufacturers are allowed for the conversion of the machines only one year as in scenario 2 or three years can't be recognised in this contemplation, the emissions of the population are at a comparable magnitude. From the year 2047 in these scenario only machines with the exhaust gas emission Stage V are encountered, so that to the year 2050 no further savings materialise. Because in scenario 4 it is emanated, that the requested conversion period of one year can't be met and thus in the year 2020 only 33 % of the crane models and in the year 2021 only 66 % of the crane models are available for replacing the old machines, in the first years even a higher particle emission unfolds than in scenario 1, in which the Stage V is not implemented at all. Only by further penetration of the population with machines of the Stage V the level of scenario 1 is reached to attain the emission values of the scenarios 2 and 3 in the years to follow.

In summary it can be said, that the transition time for the implementation of Stage V can have significant impacts with regard to the emissions. If this period is set too short in the worst case not all machines can't be converted until the end of the transition period. This leads to the situation that old machines must remain longer in the population, which feature a higher pollutant emission. The differences between a transition times of three years compared with one year, if the conversion was feasible in one year, are just marginal. In the end in both scenarios the same low emission levels are reached in the year 2041 for nitrogen oxide and in the year 2047 for the particle emission.

6.5 Cost-Effectiveness Analysis for the determination of the consequences for the society and the health of the generated scenarios

To evaluate the scenarios as generated in chapter 6.3 regarding the social-economic impacts the monetary impacts of the implementation of the PN limit values for the mobile crane industry are calculated based on the generated scenarios. The calculation process as well as the assumptions made are lodged in Annex F.

Table 6-1 shows the net benefit and the cost-benefit-ratio for the society for the scenarios 2, 3 and 4. In this contemplation the costs arise at the engine and mobile crane manufacturers for the implementation of Stage V. The hereby generated benefit originates by the prevention of exhaust gas emissions in the society (prevented air pollution costs). The concrete costs determined for this calculation, which represent

the benefit, are prevented health costs, which to the largest extent are caused by the particle emission [CEDe-2011]. The calculated net benefit for the society (NVP), at implementation of the emission Stage V for AT-cranes in Europe, is for all three scenarios negative. The cost-benefit-ratio for all three scenarios lies at minus 70 percent. For that in comparison of the indication of the net benefit for the complete mobile machines and devices with engines in the power range 56 – 560 kW from the calculation of the European Commission in the Impact Assessment [SWD (2014) 281] for the proposal of the new Stage V [COM (2018) 581] is presented in the first column.

Table 6-1: Cost-benefit-ratio of the generated scenarios for the implementation of new emission limit values for AT-cranes with contemplation of the costs for engine and mobile crane manufacturers

	Proposal SWD (2014) 281 for NRMM	**Scenario 2*1**	**Scenario 4*2**	**Scenario 3*3**
Category [kW]	56 - 560	56 - 560	56 - 560	56 - 560
Reference period	2020-2050	2020-2050	2020-2050	2020-2050
INCREMENTAL COMPLIANCE COSTS				
Development and production costs (engine manufacturer)	371 m€	33,88 m€	33,88 m€	33,88 m€
Redesign and adaption costs (machinery manufacturer)	332 m€	32,15 m€	32,15 m€	32,15 m€
Operational costs (user)	-	-	-	-
Total costs	**703 m€**	**66,03 m€**	**66,03 m€**	**66,03 m€**
INCREMENTAL BENEFITS				
Reduction of PM2.5 emissions, in 2040 vs. BAU	-1.380 t/y	-11 t/y	-11 t/y	-11 t/y
Monetised impact for PM2.5	2.294 m€	17,04 m€	6,28 m€	16,08 m€
Total benefits	**2.297 m€**	**17,04 m€**	**6,28 m€**	**16,08 m€**
BENEFIT-COST CALCULATION				
Net impact for society (NPV)	**1.591 m€**	**-48,99 m€**	**-59,75 m€**	**-49,95 m€**
Benefit/Cost ratio	226%	-74%	-90%	-76%
Specific $PM_{2.5}$ in year 2020 / 2050 (cf. chapter 4.2)	60.200t / 1.380t	347t (0,57%) / 18t (1,30%)	366t (0,61%) / 18t (1,30%)	348t (0,57%) / 18t (1,30%)

*1 **Scenario 2**: Mobile cranes compulsory transition phase of 12 months; conversion time frame of 12 month in the ideal case with the result, that from 2020 only cranes with the Stage V are sold in the EU

*2 **Scenario 4**: Mobile cranes compulsory transition phase of 12 months; a conversion time frame in the normal case of 36 months with the result, that from 2020 1/3 of the cranes with Stage V and no crane with Stage IV are sold in the EU; from 2021 2/3 with Stage V and no with Stage IV; from 2022 all cranes with the Stage V. Nonconverted crane models are not available in 2020 and 2021.

*2 **Scenario 3**: Mobile cranes transition phase of 36 months for mobile cranes and a conversion time frame in the normal case of 36 months with the result, that from 2020 1/3 of the cranes with stage V and 2/3 with Stage IV are sold in the European Union; 2021 2/3 with Stage V and 1/3 with Stage IV ; from 2022 all cranes with Stage V

The Table 6.2 shows the same calculation, however this time only with calculated costs for the mobile crane manufacturers for the conversion of all AT-crane models. Even at the exclusive contemplation of the costs only for mobile crane manufacturers the net benefit for the society is negative. The reason for this is that the share of the PM emissions of AT-cranes is relative low. The arising expenditures for the conversion to the new Stage V however are high.

Table 6-2: Cost-benefit-ratio of the generated scenarios for the implementation of new emission limit values with contemplation of the costs only for the mobile crane manufacturers

	Option 3 SWD (2014) 281	**Scenario 2**	**Scenario 4**	**Scenario 3**
Category	56 - 560	56 - 560	56 - 560	56 - 560
Reference period	2020-2050	2020-2050	2020-2050	2020-2050
INCREMENTAL COMPLIANCE COSTS				
Development and production costs (engine manufacturer)	371 m€	-	-	-
Redesign and adaption costs (machinery manufacturer)	332 m€	32,15 m€	32,15 m€	32,15 m€
Operational costs (user)	-	-	-	-
Total costs	**703 m€**	**32,15 m€**	**32,15 m€**	**32,15 m€**
INCREMENTAL BENEFITS				
Reduction of PM2.5 emissions, in 2040 vs. BAU	-1.380 t/y	-11 t/y	-11 t/y	-11 t/y
Monetised impact for PM2.5	2.294 m€	17,04 m€	6,28 m€	16,08 m€
Total benefits	**2.297 m€**	**17,04 m€**	**6,28 m€**	**16,08 m€**
BENEFIT-COST CALCULATION				
Net impact for society (NPV)	**1.591 m€**	**-15,11 m€**	**-25,87 m€**	**-16,07 m€**
Benefit/Cost ratio	226%	-47%	-80%	-50%
Specific $PM_{2.5}$ in year 2020 / 2050 (cf. chapter 4.2)	60.200t / 1.380t	347t (0,58%) / 18t (1,30%)	366t (0,61%) / 18t (1,30%)	348t (0,58%) / 18t (1,30%)

*1 **Scenario 2**: Mobile cranes compulsory transition phase of 12 months; conversion time frame of 12 month in the ideal case with the result, that from 2020 only cranes with the Stage V are sold in the EU

*2 **Scenario 4**: Mobile cranes compulsory transition phase of 12 months; a conversion time frame in the normal case of 36 months with the result, that from 2020 1/3 of the cranes with Stage V and no crane with Stage IV are sold in the EU; from 2021 2/3 with Stage V and no with Stage IV; from 2022 all cranes with the Stage V. Nonconverted crane models are not available in 2020 and 2021.

*2 **Scenario 3**: Mobile cranes transition phase of 36 months for mobile cranes and a conversion time frame in the normal case of 36 months with the result, that from 2020 1/3 of the cranes with stage V and 2/3 with Stage IV are sold in the European Union; 2021 2/3 with Stage V and 1/3 with Stage IV ; from 2022 all cranes with Stage V

Bibliography

[CEDe-2011] CE Delft; INFRAS; Fraunhofer ISI: External Costs of Transport in Europe - Update Study for 2008. Delft: 2011. URL: http://ecocalc-test.ecotransit.org/CE_Delft_4215_External_Costs_of_Transport_in_Europe_def.pdf Download am 30.10.2014

[COM (2014) 581] Europäische Kommission: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Brüssel, 2014

[DEU-2014] Deutz AG: Technologien. Aufruf am: 10.12.2014. URL: http://www.deutz.de/produkte/technologien.de.html

[EC-2013] Consolidated Version of the DIRECTIVE 97/68/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. (2013)

[EG-2011] Konsolidierte Fassung der RICHTLINIE 97/68/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. (2011)

[EPA-1991] United States Environmental Protection Agency: Nonroad Engine and Vehicle Emission Study – Report. Washington. 1991.

[EN13000:2010] EN13000:2010: Krane – Fahrzeugkrane. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.

[FEM-2014] FEM position paper: Commission Proposal regarding requirements relating to emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Document FEM CLE MC N 0697 Final. Frankfurt, 2014

[Ham-2000] Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, A.; Schriever, U.:Einsatz hochfester Stähle im Mobilkranbau. In: Stahlbau, Jg. 69 (2000), Heft 4, S. 295-305.

[Hel-2009] Helms, H.; Lambrecht, U.; Knörr, W.: Aktualisierung des Modells TREMOD – Mobile Machinery (TREMOD-MM). Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2009.

[Hel-2014a] Helms, H.; Heidt, C.: Schadstoffemissionen und Belastungsbeitrag mobiler Maschinen in Baden-Würtemberg. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2014.

[Hel-2014b] Helms, H.; Heidt, C.: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2014.

[Hum-2003] Hummel, H.: Ermüdungsverhalten geschweißter Bauteile aus hochfesten Sonderbaustählen in Mobilkranen, Dissertation, Rheinisch-Westfälische-Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2003.

[JRC-2008] Krasenbrink, A.; Dobranskyte-Niskota, A.: 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC Part II. Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, 2008.

[Kle-2012] Borken-Kleefeld, J.; Ntziachristos, L.: The potential for further controls of emissions from mobile sources in Europe. Forschungsbericht: International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Lab of Applied Thermodynamics and EMISIA, Thessaloniki. 2012. URL: http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/TSAP-TRANSPORT-v2-20121128.pdf Download am 30.10.2014

[Kön-2011] König, H.: Maschinen im Baubetrieb. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

[Lam-2004] Lambrecht, U.; Helms, H.; Kullmer, K.; Knörr, W.:Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs in mobilen geräten und Maschinen. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2004.

[LMB-2014] Liebherr Machines Bulle S.A.: Liebherr Abgasnachbehandlungssysteme für Dieselmotoren (2014) URL: http://www.liebherr.com/CP/de-DE/default_cp.wfw/printTrue/tab-131726?file=%7e%2fCMS%2fdownloads%2fBP_Abgasnachbehandlung_de_web.pdf Download am 14.10.2014

[o.V.-2014] Ohne Verfasser: One lump or two. In: cranes & access, Jg. 16 (2014) Heft 2, S. 17-24

[Qua-2008] Quass, U.; John, A. C.; Beyer, M.; Lindemann, J.; Kuhlbusch, T. A.J.: Ermittlung des Beitrags von Reifen-, Kupplungs-, Brems-, und Fahrbahnabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen. Forschungsbericht: Institut für Umweltanalytik, Universität Duisburg-Essen. 2008.

[Sch-2008] Schäffeler, U.; Keller, M.: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Forschungsbericht: Bundesamt für Umwelt, Bern. 2008.

[Sch-2013] Schilling, T.; Frenkel, A.; Bruns, R.; Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Braun, M.; Linsel, P.; Furmans, K.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln der Intralogistik. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Maschinenelemente und technische Logistik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technischen Universität München, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie. 2013.

[SWD (2014) 281] European Commission: IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Review of Directive 97/68/EC on emissions from engines in non-road mobile machinery in view of establishing a new legislative instrument. Brüssel, 2014

[UNEP-2013] United Nations Environment Programme: Diesel Fuel Sulphur Levels: Global Status. Download: 10.11.2014. URL: http://www.unep.org/transport/pcfv/PDF/Maps_Matrices/world/sulphur/MapWorldSulphur_October2013.pdf

[VDMA-2014] VDMA: Ein Umsatzplus von mindestens fünf Prozent wird erwartet – Geplante Emissionsstufe V ist »äußerst ambitioniert«. In: baumagazin.de. URL: http://www.baumagazin.eu/ein-umsatzplus-von-mindestens-fuenf-prozent-wird-erwartet-geplante-emissionsstufe-v-ist-aeusserst-ambitioniert/ Aufruf am 07.12.2014

[Vol-2010] Volvo Construction Equipment: Senkung der Abgasemissionen - in Richtung “Stufe IIIB/Tier 4 Interim” Abgasnormen für Dieselmotoren in Non-road Applikationen FRAGEN UND ANTWORTEN Stand April 2010. Download: 28.09.2014. URL: http://www.volvoce.com/SiteCollectionDocuments/VCE/Documents%20Global/VCE%20Corporate/QnA%20Stage%20IIIB%20Tier%204%20Interim%20BAUMA%20version_DE.pdf

[2007/46/EC] EG-Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge: Richtlinie 2007/46/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge

List of Figures

Figure 1-1: Development of the emission limit values for On-Road and Off-Road in the EU [Picture: VDMA, Liebherr, MAN] 1

Figure 2-1: Mobile cranes divided into road permitted all-terrain cranes, cross-county rough-terrain cranes and crawler cranes 6

Figure 2-2: Emission limit values of the implemented stages in the EU [Vol-2010] 7

Figure 2-3: Implementation of the emission stages according to the engine power classes in the EU [Vol-2010] 7

Figure 2-4: Proposal for implementation of the emission Stage V for engines of the power class 56-560 kW in the EU 9

Figure 2-5: Restrictions for the AT-cranes due to the road approval 10

Figure 2-6: Worldwide exhaust gas emission regulations 2014 11

Figure 2-7: Global stages for low sulphur diesel fuel 10/2013 [UNEP-2013] 12

Figure 2-8: All-terrain crane in driving position 13

Figure 2-9: Components and setup of an AT-crane 14

Figure 2-10: Multiple hoisting tasks and fields of operation of all-terrain cranes 15

Figure 3-1: Procedure for construing of the basis emission factor for AT-cranes 19

Figure 4-1: Development of the nitrogen oxide emissions (basis Stage IV) of all-terrain cranes in the European Union 23

Figure 4-2: Contribution of the individual population ages to the nitrogen oxide emission in the European Union from AT-cranes for the year 2014 25

Figure 4-3: Development particle emission (basis Stage IV) of all-terrain cranes in the European Union 26

Figure 4-4: Comparison of a worn tyre with a new tyre for AT-cranes 28

Figure 4-5: Contribution of the individual population ages to the particle emission in the European Union of AT-cranes for the year 2014 30

Figure 5-1: Alteration at the superstructure due to alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment, starting from the Stage III A to III B and to IV 32

Figure 5-2: Alteration at the carrier due to alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment, starting from the Stage III A to III B and from III B to IV 32

Figure 5-3: Chronological progress of the conversion phases of AT-cranes 35
Figure 5-4: Economical consequences for the mobile crane industry due to the conversion of AT-cranes to new exhaust gas stage 38
Figure 5-5: From global engine to the complex control and storage of different engines from 2010 38
Figure 6-1: Setup superstructure of the emission Stage IV as starting situation 42
Figure 6-2: Installation study for the exhaust gas aftertreatment system Stage V 43
Figure 6-3: Installation situation of the AGN Stage V at the superstructure 43
Figure 6-4: Comparison of the engine installation situation of the Stage IV (left) and the Stage V (right) at the carrier of an AT-crane 44
Figure 6-5: Installation situation of the AGN Stage IV in the carrier..... 45
Figure 6-6: Comparison between the AGN Stage IV and the Stage V for the installation in the carrier 46
Figure 6-7: Setup carrier of the emission stage IV as starting situation 46
Figure 6-8: Chronological process scenario 1 50
Figure 6-9: Chronological process scenario 2 51
Figure 6-10: Chronological process scenario 3 52
Figure 6-11: Chronological process scenario 4 53
Figure 6-12: Comparison of the age structure of scenario 3 and scenario 4 in the year 2025..... 54
Figure 6-13: Development of the nitrogen oxide emission during the period under review from 2020 to 2050 in the European Union 55
Figure 6-14: Development of the particle emission during the period of review from 2020 to 2050 in the European Union 56

Figure A-1: Lattice boom crawler crane with test lifts on the test field A-2
Figure A-2: Rough-terrain crane in working position A-3
Figure A-3: Autokran auf einem Lkw-Fahrgestell.....A-4
Figure A-4: All-terrain crane in working position A-4
Figure B-1: Setup of the carrier of an all-terrain crane.....B-1
Figure B-2: Setup of the superstructure of an all-terrain crane with two engines.....B-3
Figure C-1: SCR-System zur Abgasnachbehandlung für Motoren der Stufe IV für Mobil- und Raupenkrane [LMB-2014]..... C-2

Figure C-2: View superstructure AT-crane, 5 axles, capacity 200 tons, 72 m long telescopic boom with folding jib up to 36 m length C-3
Figure C-3: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage III A for installation on the AT-crane superstructure C-4
Figure C-4: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage IIIB for installation on the AT-crane superstructure C-5
Figure C-5: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage IV for installation on the AT-crane superstructure C-6
Figure C-6: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A C-7
Figure C-7: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B C-8
Figure C-8: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV C-9
Figure C-9: View carrier AT-crane, 4 axles, capacity 100 tons C-10
Figure C-10: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A for installation on an AT-crane, four axles C-11
Figure C-11: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B for installation on an AT-crane, four axles C-12
Figure C-12: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV for installation on an AT-crane, four axles C-13
Figure C-13: Engine installation at the carrier frame of a 4-axle AT-crane C-14
Figure C-14: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A C-15
Figure C-15: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B C-16
Figure C-16: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV C-17
Figure C-17: View AT-crane, 5 axles, capacity 220 tons C-18
Figure C-18: Comparison engine design and installation space of the Stage III A/B and the Stage IV for installation in the AT-crane carrier..... C-19
Figure C-19: Alterations at the AT-crane due to engine caused adaptions at the carrier of the Stage III B in comparison to the Stage III A..... C-20
Figure D-1: Procedure for derivation of the basis emission factor for AT-cranes D-2
Figure D-2: Age structure for all-terrain cranes in the European Union D-4
Figure D-3: Population structure of all-terrain cranes in the European Union .. D-5
Figure D-4: Deterioration factor for particle emission for the stage prior to III A..... D-8

Image rights

All image rights are, if not otherwise marked, reserved by the four involved companies of the FEM. All figures are, if not otherwise marked, drawn by the authors.

List of Tables

Table 4-1: Comparison of the nitrogen oxide emission of all-terrain cranes with mobile machines 24

Table 4-2: Comparison of the particle emissions of all-terrain cranes with mobile machines 27

Table 4-3: Calculation of the combustion engine generated particle emission per driven kilometre 28

Table 4-4: Calculation of the tyre wear related particulate matter emission per travelled kilometre of an AT-crane 29

Table 6-1: Cost-benefit-ratio of the generated scenarios for the implementation of new emission limit values for AT-cranes with contemplation of the costs for engine and mobile crane manufacturers 58

Table 6-2: Cost-benefit-ratio of the generated scenarios for the implementation of new emission limit values with contemplation of the costs only for the mobile crane manufacturers 59

Table D-1: Basis data for the emission inventory D-3

Table D-2: Basis emission factors for the emission inventory D-7

Table D-3: Transient adaption factors for the emission inventory D-9

Annex A Technical explanation for the classification of mobile cranes

The in this chapter presented descriptions comply essentially with the statements in [Hum-2003] and [Kön-2011].

The connection between carrier and superstructure is realised by means of a rotary assembly, which transfers the forces and moments from the superstructure to the carrier. The necessary power for the traction and crane operation is up to this date provided by diesel engines, as only by this means the high demands with regard to the mobility of the machines can be accomplished. The drive of the crane functions as a rule is effected diesel-hydraulically; the power for the traction drive of the crane is transmitted to the axles with a mechanical gearbox with the exception of the crawler crane. The superstructure of a mobile crane can be free slewable, limited slewable or non slewable. It is generally equipped with one or more hoist gear and / or with hydraulic cylinder for lifting ad lowering of the boom and the load. As boom systems either telescopic booms, which can be elongated with different boom extensions, or jibs or lattice booms are employed. The loads hanging from the boom head can be handled with a hook block or with other load handling devices for special applications. [EN13000:2010]

As essential requirement for a mobile crane the following aspects according to [Ham-2000] are to be recognised:

- High capacity and large working range
- Great mobility at a low design deadweight
- Optimised price- / performance ratio

The capacities today are up to more than 3,000 t and the attainable boom lengths more than 200 m, at which the largest capacities only in a small distance to the slewing ring centre can be achieved.

Crawler cranes

Crawler cranes accomplish within the product category mobile cranes the highest capacities and largest radii and are used in particular for lifting of heavy loads for the construction of power plants, refineries or for the erection of wind energy facilities. Figure A-1 shows a crawler crane with test lifts on the test field.

Figure A-1: Lattice boom crawler crane with test lifts on the test field

erected condition with load on the job site. For the transport between the individual jobs sites it must be possible to dismantle the crane into smaller modules, as the total mass and the dimensions of the crane otherwise don't permit a transport on public roads. At the job site initially the crane must be erected resp. rigged by means of a further crane to be able to carry out lift operations. As boom systems at crawler cranes lattice booms as well as telescopic boom systems are used. Crawler cranes are depending on the particular lift task deployable in a lot of different rigging conditions with regard to the boom and ballast configuration. The operation of the crane and the traction drive is carried out from the superstructure cab; a separate cab for the chassis doesn't exist.

Off-highway cranes

The off-highway crane (rough-terrain crane) is a mobile crane design, which is especially tailored for the use in heavy terrain on job sites. In Figure A-2 such an off-highway crane in working position is shown.

Figure A-2: Rough-terrain crane in working position

Rough-terrain cranes in general possess only two axles with very big tyres, by which very good driving characteristics in heavy terrain can be achieved. However by this the permissible axle loads and dimensions for a participation in public road traffic are considerably exceeded, which is why these cranes have to be transported to the individual job sites on lowbed trailers. For these transports also the described restrictions regarding dimensions and axle loads apply. Similar to the crawler cranes the operation is carried out from the superstructure cab, a chassis cab is not installed on these cranes.

Truck cranes

At truck cranes resp. road cranes the superstructure of the crane is mounted to a commercial truck chassis. Figure A-3 shows a truck crane with a capacity of 65 t on a four-axle truck.

The superstructure of truck cranes correspond in its setup to the superstructure of an all-terrain crane. Because the frame of a truck has not the ability to take the loads from the crane operation, the crane is mounted to the truck frame by means of an intermediate frame, which also includes the folding resp. sliding beams for the support. Due to the incorporation of a standard truck chassis these crane excel by their favourable operation costs, however are significantly inferior especially for operation in rough terrain. Additionally the crane size, for which a truck chassis is eligible, is limited to a capacity of app. 60 t to maximum 70 t, as larger cranes require more than the customary four axles of a truck chassis.

Figure A-3: Autokran auf einem Lkw-Fahrgestell

All-terrain cranes

The all-terrain crane (AT-crane) is the by far most sold mobile crane type in the European Union. The sizing resp. classification of these cranes is essentially conducted according to the maximum capacity, in which for the mission specific selection of a crane further criteria play an important role. Corresponding to the denomination this crane can travel on rough terrain as well as on public roads. Figure A-4 shows two AT-cranes during a lift of prefabricated concrete parts.

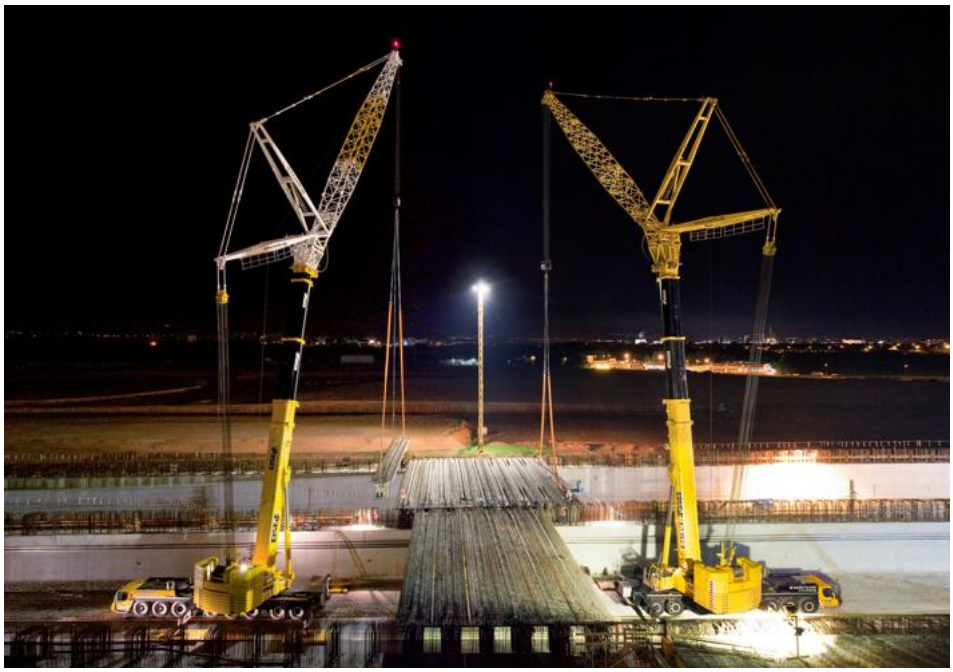

Figure A-4: All-terrain crane in working position

Small AT-cranes, up to a capacity of app. 50t, can in many cases be driven from one job site to the next with its complete equipment, whereas at larger units a part of the equipment like e. g. ballast, boom extensions, the telescopic boom itself or the supports must be transported separately to each job site by lowbed trailers. The background for this is the limitation of the axle loads and the vehicle dimensions for the participation in the public highway traffic.

Annex B Technical description to the setup of the carrier and superstructure of the all-terrain cranes

Principal setup carrier

Figure B-1- shows the components and the setup of the carrier of a four-axle AT-cranes.

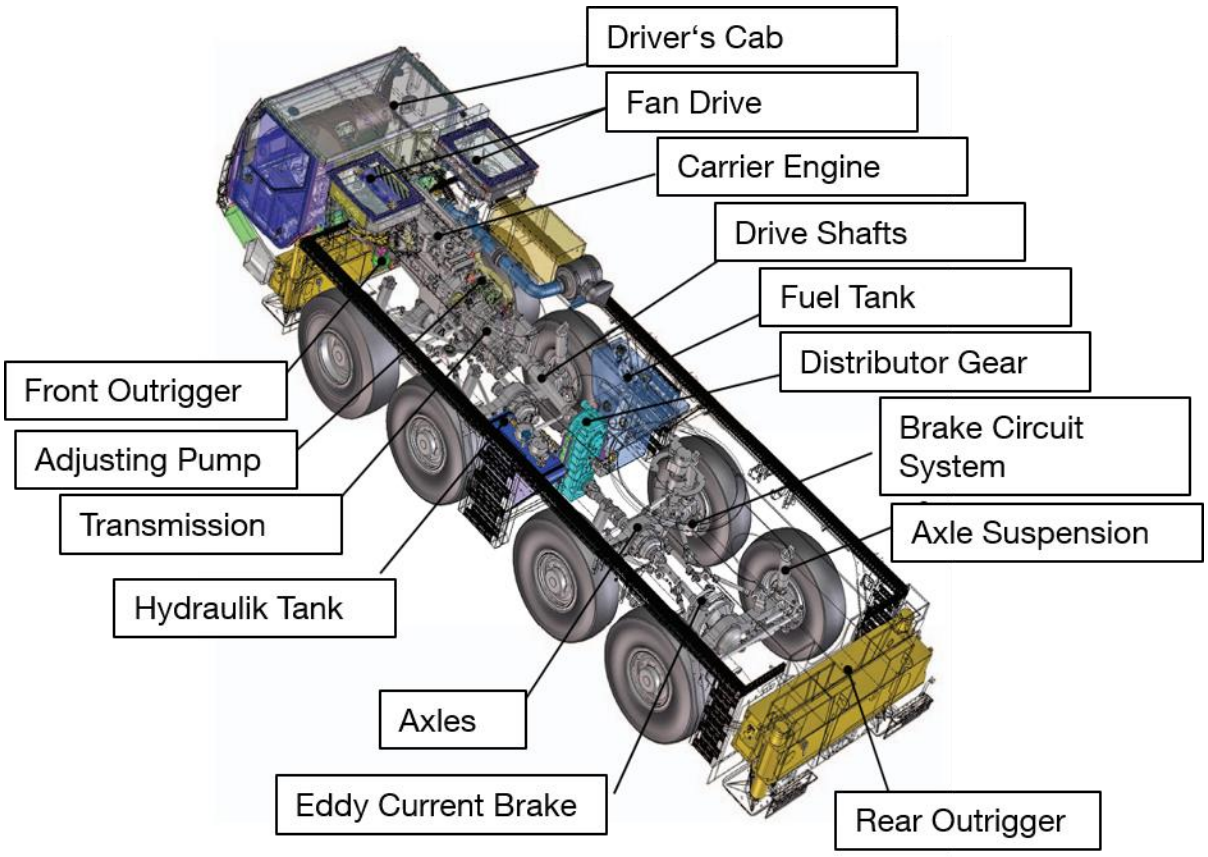

Figure B-1: Setup of the carrier of an all-terrain crane

The structure of the carrier consists of a welded frame design of high-tensile fine grain construction steel, which is needed for the necessary strength and rigidity for the crane and driving operation. At the front at this frame the driver cab is attached, from which the traction drive of the crane is handled. The outfit of the cab with regard to comfort and ergonomics orientates itself meanwhile very strongly at the utility vehicle segment. Centred behind the driver cab the carrier engine is installed in a frame cut-out. Left and right of the engine the cooling system and at newer machines also components of the exhaust gas aftertreatment system are situated. The engine transfers its power via an automised gearbox, which is directly flanged to the engine, and prop shafts to the drive axles. The high number of driving steps of 12 or 16 in modern gearboxes serves for favourable fuel consumption. At AT-cranes

mostly several axles are driven to warrant a good manoeuvrability also off site. For this requirement length and traverse locks in the drive train also account. Because an AT-crane compared to other vehicles features very large dimensions, on most models all axles are steerable to warrant a sufficient manoeuvrability also at constricted sites as e. g. in city centres. By means of the air spring system the individual axles are separately liftable. Beside the operation brake, which is executed as a pneumatic brake, most AT-cranes due to their high masses are equipped also with a wear free constant brake system (Eddy-currant brake or hydrodynamic retarder), which acts on one of the prop shafts and supports the operation brake. Between the axles in the carrier the fuel tank, the oil tank for the supply of the hydraulic system of the carrier and also the AdBlue tank are placed. At the ends of the frame at smaller and medium sized cranes sliding beam boxes for the accommodation of the supports are integrated, which are placed directly beneath the slewing ring. The slewing ring establishes the connection to the superstructure and transfers the forces and moments resulting from the crane operation to the carrier structure.

Superstructure / turn table

In Figure B-2 the schematic setup of the superstructure / turntable of a two-engine crane with the most important components is presented. The superstructure is connected to the carrier by the slewing ring. The load-bearing framework of the superstructure consists similar to the carrier of a welded frame made from high tensile fine grain construction steel, to which all components of the superstructure are attached. All-terrain cranes are generally executed with a telescopic boom, which is hinged at the upper side to the end of the superstructure and extendable and retractable by means of a hydraulic cylinder. The luffing function for the boom is performed also by a hydraulic cylinder. As energy source for the crane function a diesel engine is used, which is installed in this example at the right side of the frame. The hydraulic pumps for the generation of the pressure and volume stream are directly connected to the engine via a distribution gearbox. The supply of the individual consumers is affected by means of hose lines, the control by activation via control blocks and valves.

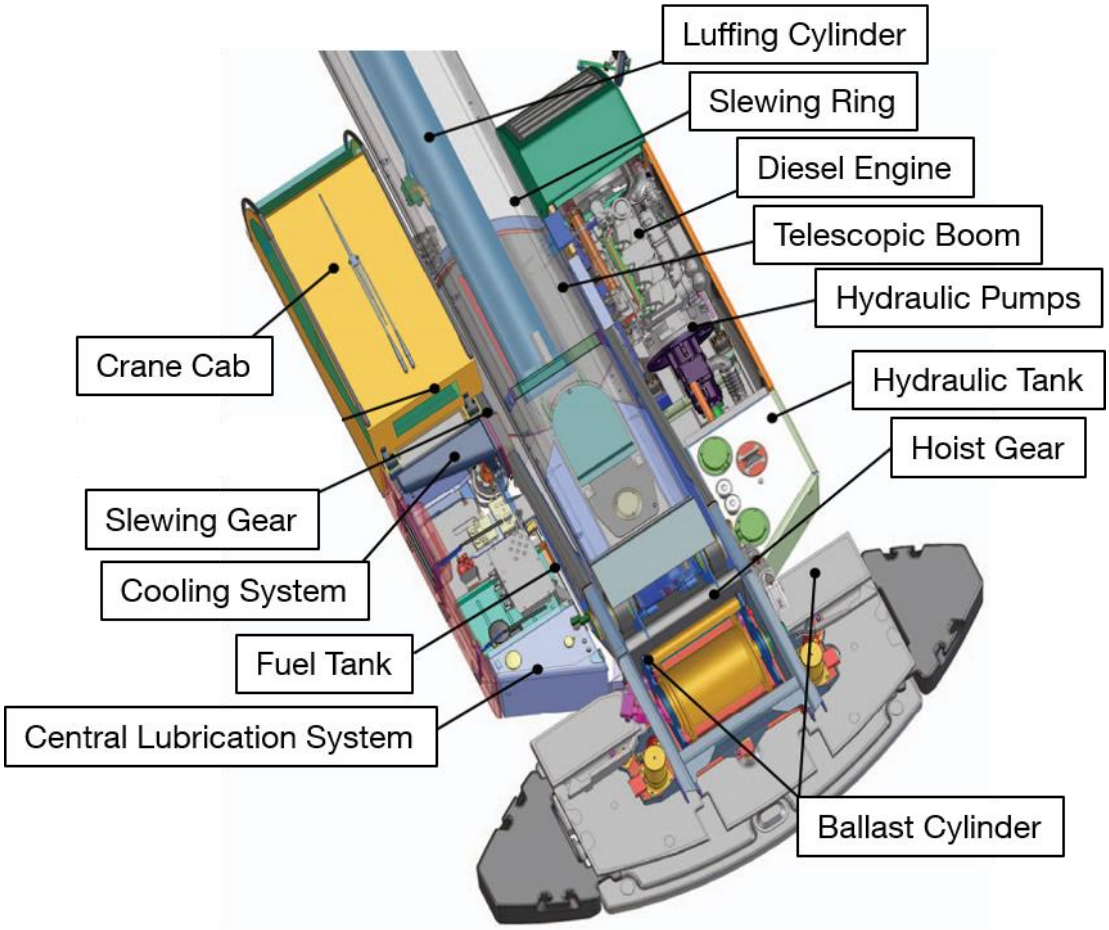

Figure B-2: Setup of the superstructure of an all-terrain crane with two engines

Behind the engine the oil tank for the supply of the hydraulic is mounted. The rope winch and the slewing gear each are driven by a hydraulic motor. The ballasting cylinders serve for taking up of the counterweight, which is placed during road travelling on the carrier frame (see Figure 2-9) or which must be transported separately with a truck. At the left side of the superstructure behind the driver cab, from which the crane functions are operated, the cooling system, the fuel tank for the superstructure engine and the central lubrication system are installed.

Annex C Technical explanation to the implication rating of the conversion from Stage III A to III B and III B to IV

C.1 Exhaust gas aftertreatment systems

To maintain the permissible emission limit values from the Stage III B special AGN-systems are needed. At mobile machines and devices from implementation of the Stage III B two different approaches have developed. On one side system exist, which apply diesel particle filters (DPF) for maintaining the particle limit values and internal engine measures like exhaust gas recirculation for reducing the nitrogen oxide emissions. On the other side systems exist, with which the particle limit values can be achieved by engine internal measures and the nitrogen oxide emissions by means of a SCR-system. Equivalent to the application in mobile cranes and especially in AT-cranes exclusively the SCR-technology is applied at the superstructure as well as at the carrier for the exhaust gas aftertreatment at the Stage III B and IV. Solutions without SCR but with DPF up to today are not used on mobile cranes in Europe. In Figure C-1 the function of the SCR-system is schematically presented for the Stage IV.

In the SCR-catalyser the nitrogen oxides contained in the exhaust gas are chemically reduced. Therefore via an injector a urea dilution (AdBlue®) is added to the exhaust gas. In the hydrolysis catalyser from this ammonia and CO_2 is is generated so that finally the coating in the SCR-catalyser causes the reaction of ammonia and nitrogen oxide to nontoxic nitrogen and water vapour [LMB-2014].

With the additional SCR-system for Stage III B as also for Stage IV more components are added to the engine, which also need equivalent installation space at the AT-crane. The available installation space on the AT-crane however is based on the specific requirements not extendable at will. Below the specific place and weight problems are exemplarily shown at the example of a superstructure and at two examples of the carrier for the conversion of AT-crane from Stage III A to III B and from Stage III B to IV.

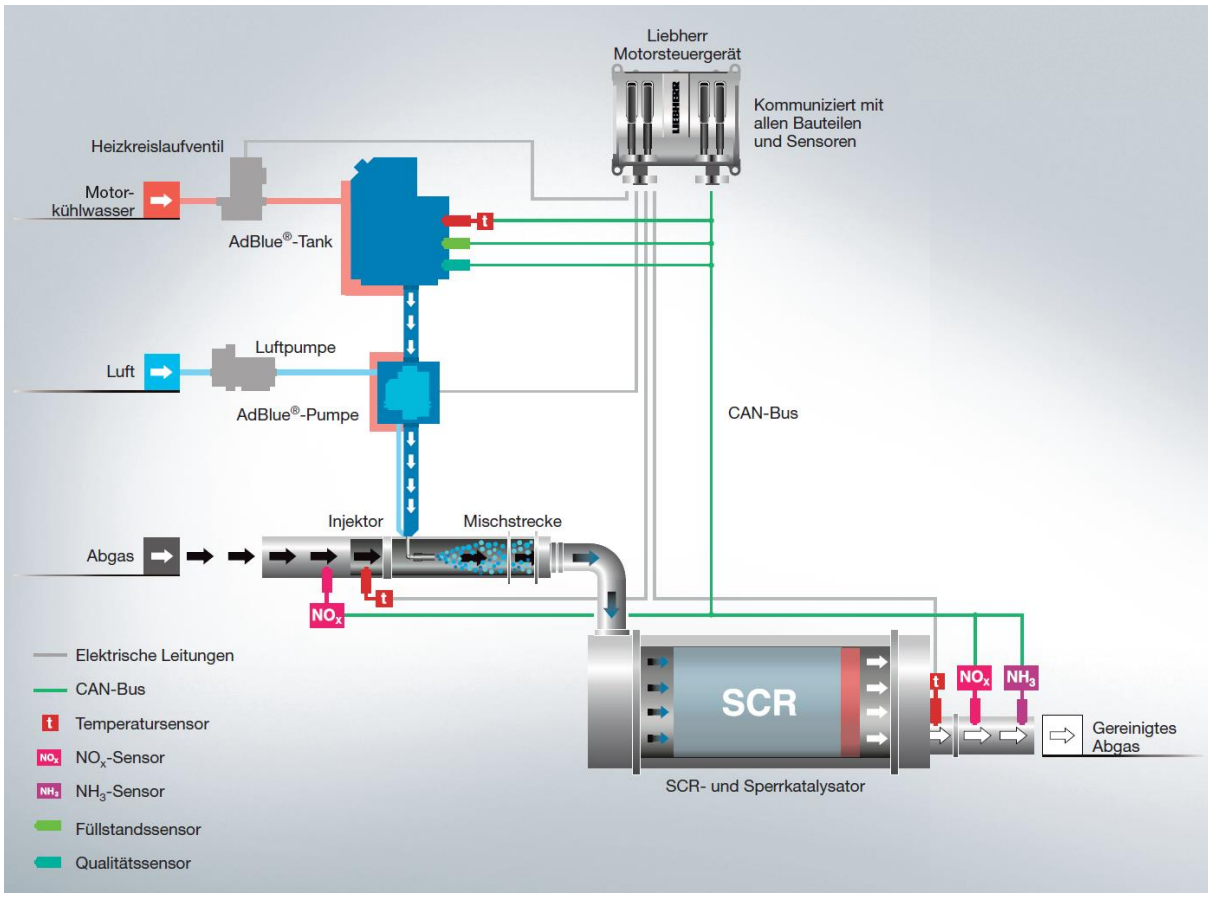

Figure C-1: SCR-System zur Abgasnachbehandlung für Motoren der Stufe IV für Mobil- und Raupenkrane [LMB-2014]

C.2 Design alterations at the AT-crane superstructure due to new engine systems of the Stage III B and Stage IV

In Figure C-2 is exemplarily an AT-crane with five axles presented to which the envisaged alterations in the area of the superstructure with its main components relate.

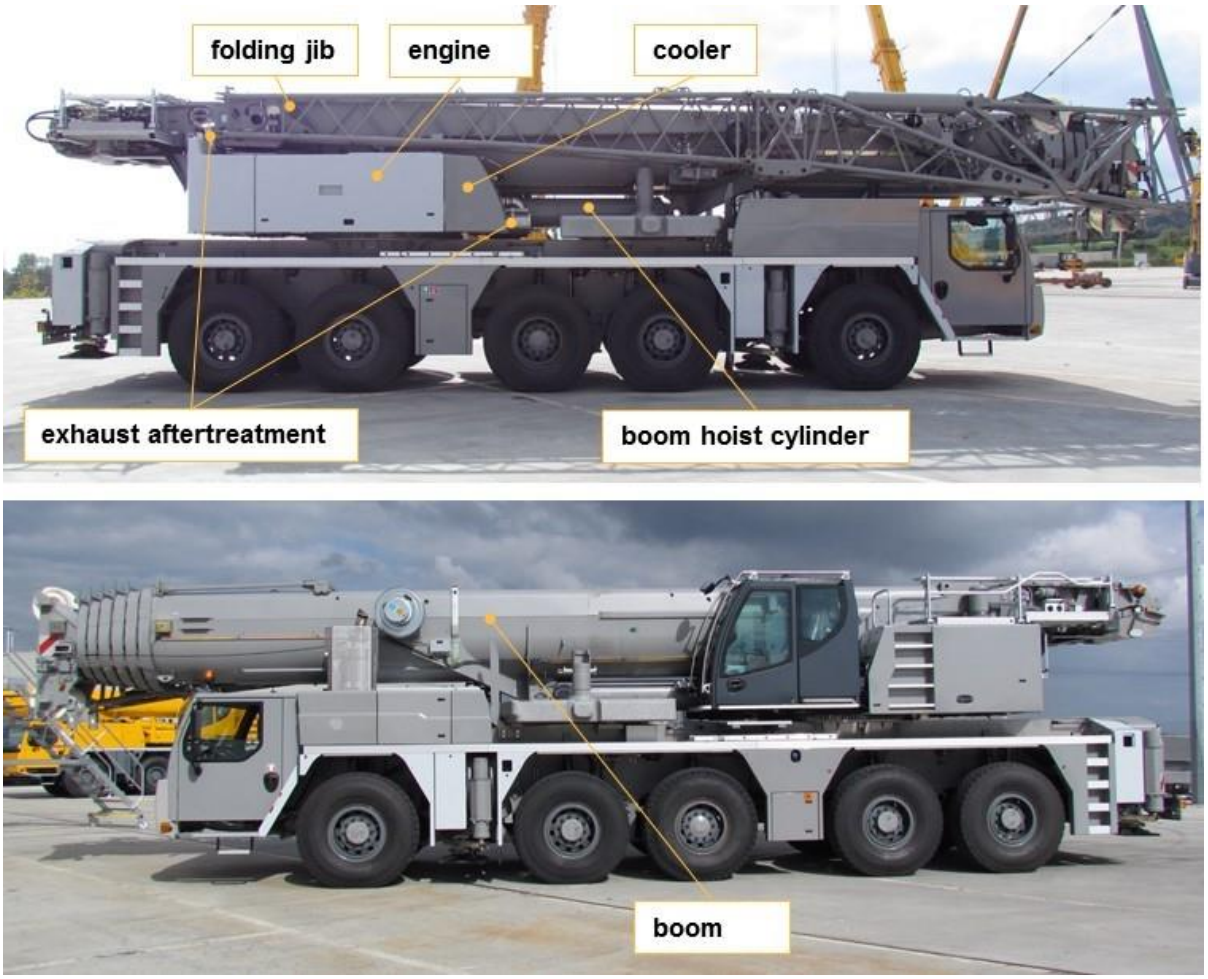

Figure C-2: View superstructure AT-crane, 5 axles, capacity 200 tons, 72 m long telescopic boom with folding jib up to 36 m length

Alterations of the engine system

The engine of the Stage III A installed on the superstructure is shown in Figure C-3. The engine can be seen with cooler attached to the front (in the picture at right side). The exhaust gas aftertreatment system consists of an exhaust gas pot with silencer and spark arrestor and the end tube at left and the feeding tube system at right side of the pot.

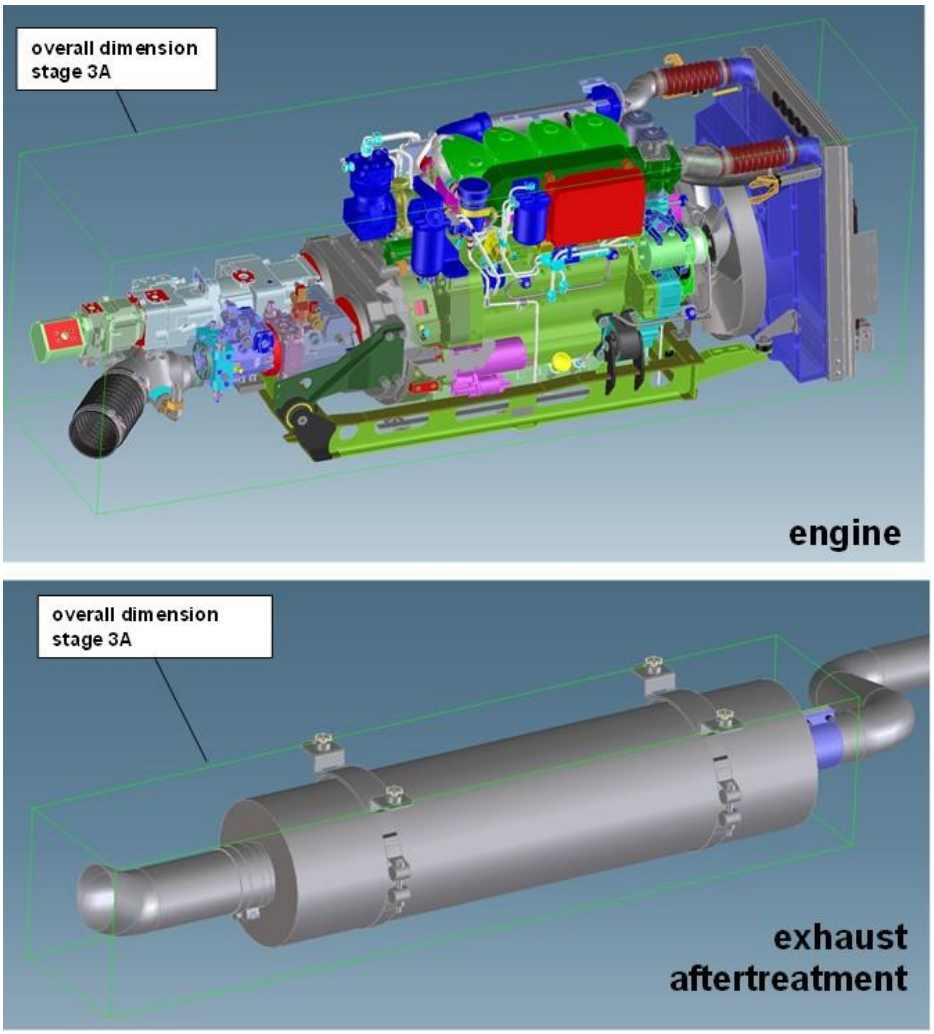

Figure C-3: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage III A for installation on the AT-crane superstructure

Figure C-4 shows the engine of the Stage III B as well as the related SCR-system, which is necessary to maintain the limit values. The volume of the pictured engine is increased by 4.6 percent in comparison to an engine Stage III A, in which the weight was reduced by 40 kg. Basically the amount of heat of the new engines of Stage III B to be dissipated has increased, so that a larger and in comparison to Stage III A differently designed cooler was needed. The new cooler had different connections and required new tubing for charge air and cooling water. More serious alterations than at the engine unfolded with the implementation of the Stage III B at the AGN, whose volume and weight increased by 232 percent and 91 kg in comparison to the Stage III A. Decisive for this is the additional SCR-system in the exhaust gas pot.

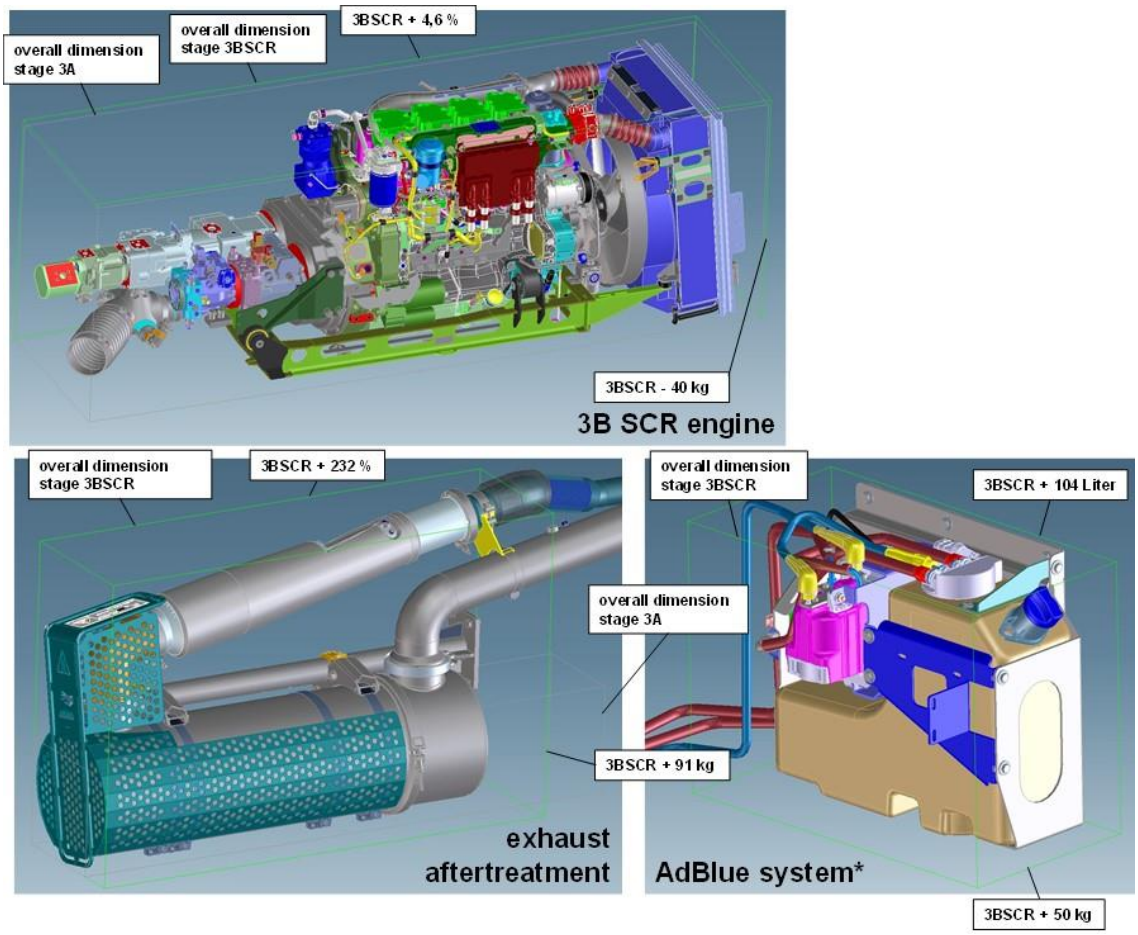

Figure C-4: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage IIIB for installation on the AT-crane superstructure

Added to the SCR-system are the pump unit, the dosing unit and the urea tank. Beside the additional necessary installation space with the urea tank in the example shown in Figure C-5 a mass of 50 kg is added. The size of the urea tank is depending on the amount of urea to be stored. Crucial for the installation of the exhaust gas aftertreatment system at the superstructure are the minimum distances and positions of the individual components. So the mixing tube from the injection point of the urea has to have a certain length to warrant the functionality of the exhaust gas aftertreatment system.

For the fulfilment of the exhaust gas limit values of the Stage IV at the engine further technological alterations have been affected. Analog to the engines of the Stage III B the engines and the related exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV feature altered construction dimensions, alterations of the dimensioning and the positioning of the necessary auxiliary equipment and an additional weight, which is presented in Figure C-5.

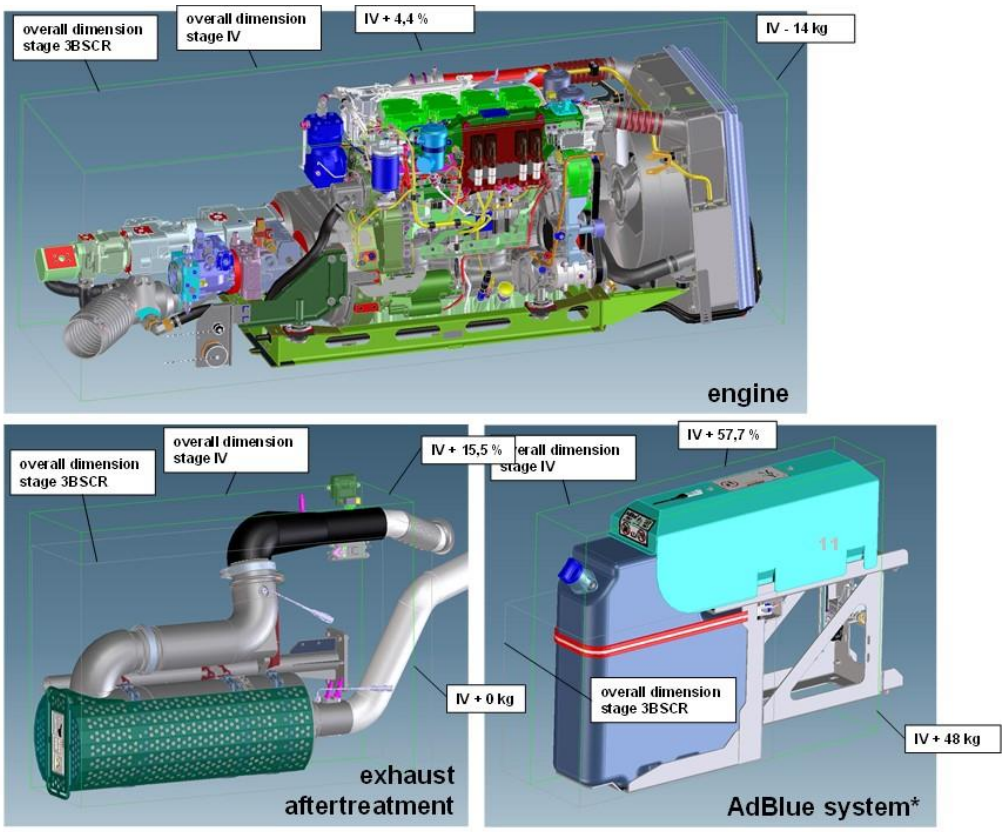

Figure C-5: Engine and exhaust gas aftertreatment system of Stage IV for installation on the AT-crane superstructure

The volume of the engine of the Stage IV has increased by 4.4 percent in comparison to the engine of the Stage III B, the mass declined by 14 kg. The front end has been changed and the connections at the engine newly positioned. Hence again ensue new alterations at the preassembly unit of the engine with a new cooler due to the increased amount of heat to be dissipated. So again the charge air lines and the cooling water hoses had to be altered and the hydraulic of the ventilator drive adapted. The SCR-system has increased in volume by 15.5 percent and constituted more restrictions for the installation. So e. g. the position of the sensors and the length of the mixing tube had to be kept exactly. Furthermore the urea tank is grown by 57.7 percent, which caused an additional weight of 45 kg.

Alterations at the superstructure

The technological enhancements of the engine and the AGN of the Stage III B as well as Stage IV caused significant machine alterations. Starting situation for the extensive design adaptions at the superstructure of AT-cranes is the Stage III A. In Figure C-6 an example for the installation situation of the diesel engine and cooler as well as the exhaust gas pot, consisting of silencer and spark arrestor, is shown. The exhaust gas pot is mounted below the fall-protection fixture. The exhaust gas tube leading from the engine to the exhaust gas pot is positioned above the engine and the oil tank.

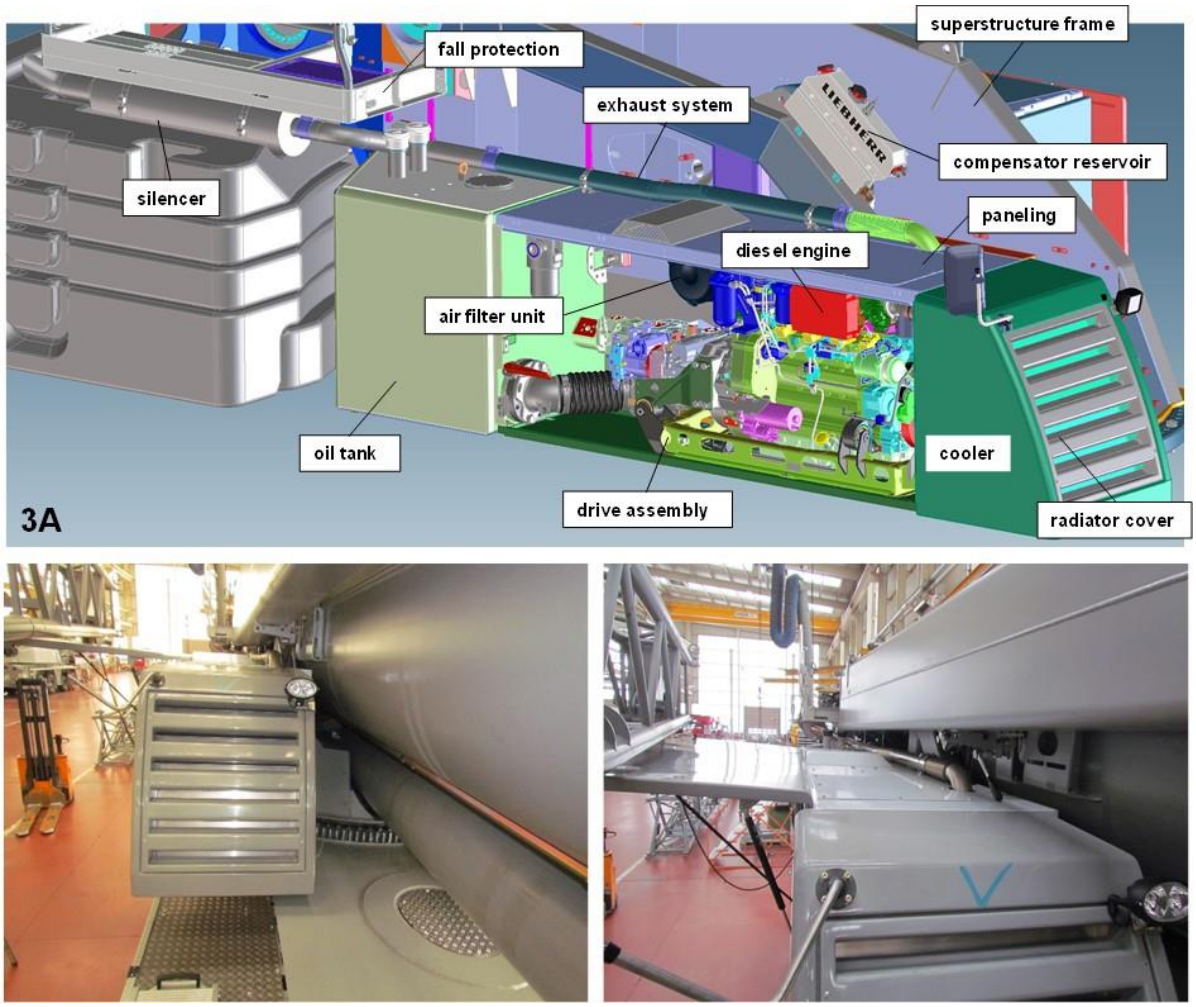

Figure C-6: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A

In comparison to Stage III A (see Figure C-6) in Figure C-7 the installation situation at the superstructure for the engine and the exhaust gas aftertreatment system of Stage III B can be seen. Clearly visible is the new added SCR-system between cooler and luffing cylinder. However due to lack of space at the superstructure this unfavourable positioning had to be selected. As the cleaned exhaust gases always still had to be discharged to the rear and because of passing pedestrians upwards, a new exhaust gas tube from the SCR-system over the oil tank and engine had to be mounted. This in turn caused alterations at the engine cover. Due to a higher exhaust gas pressure the exhaust gas tubes had to be changed with regard to the diameter and required due to the greater diameter more installation space than before. The urea necessary for the SCR-system was stored in a tank placed on the opposite side behind the crane driver cabin.

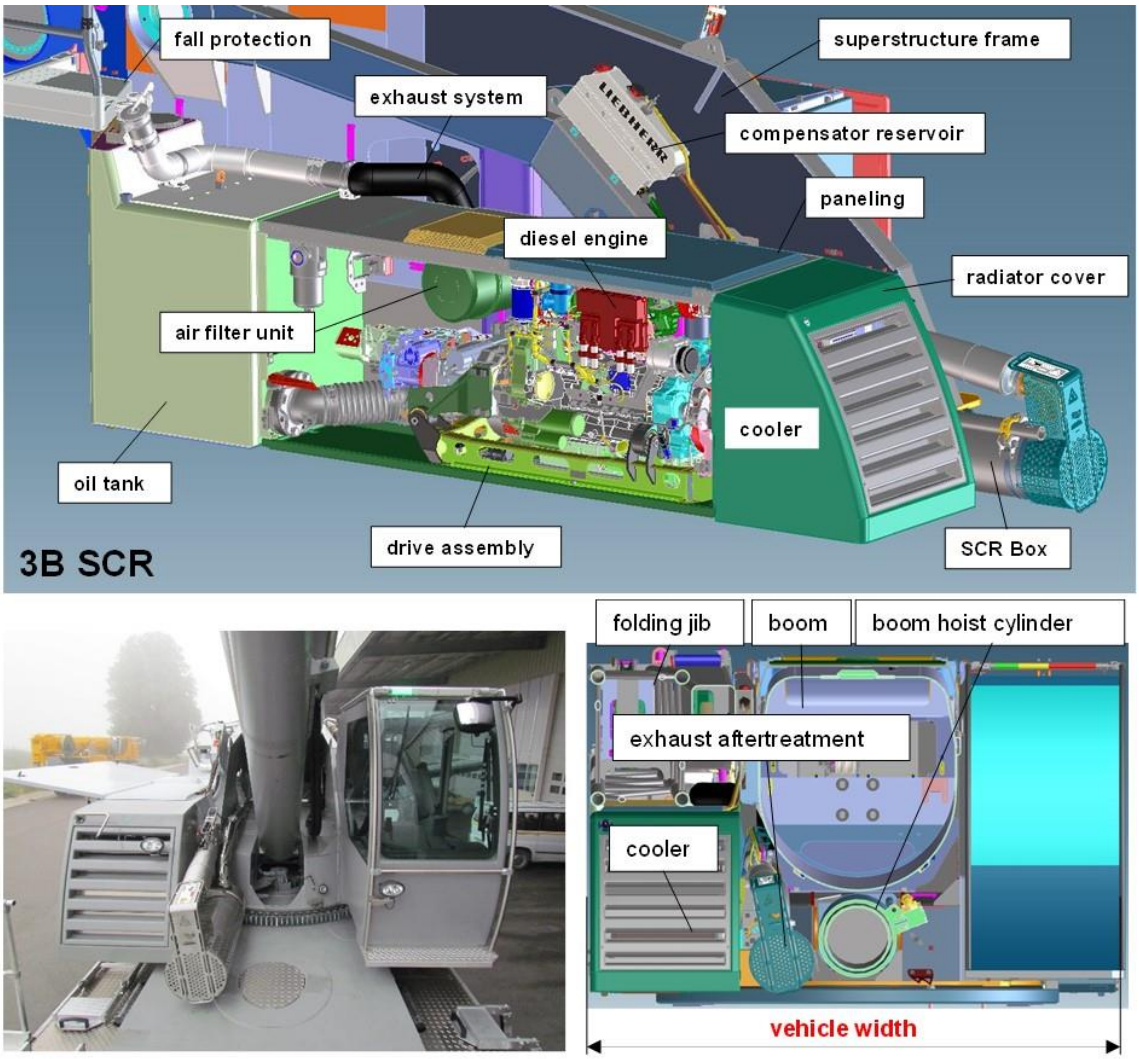

Figure C-7: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B

For the positioning of the urea tank the accessibility for filling up has to be observed. Additionally the accessibility for all other components has to be assured. Larger limitations for the installation and positioning of the components result from the installation requirements of the manufacturers as well as due to the component temperature, which can be very high at some components. The mentioned aspects limit the available space for installation at the superstructure significantly beside the increased size ratio. After the installation of the components furthermore the ascent and the decent possibility during the crane operation must be warranted. A larger turbocharger, the new position of the exhaust gas connection, a new fixture of the altered oil tank as well as a new bracket for the exhaust gas pot cause in addition alterations at the steel construction of the superstructure, so that a new calculation of the capacity was required. By the alterations additionally the complete hydraulic and electric had to be replannned and performed.

Similar alterations were also caused by the conversion of the AT-crane superstructure to Stage IV. In comparison to Stage III B the SCR-system and the urea tank with a volume increase of 15.5 percent and 57.7 percent required a significant larger installation space. Figure C-8 presents the installation situation for the Stage IV at the superstructure.

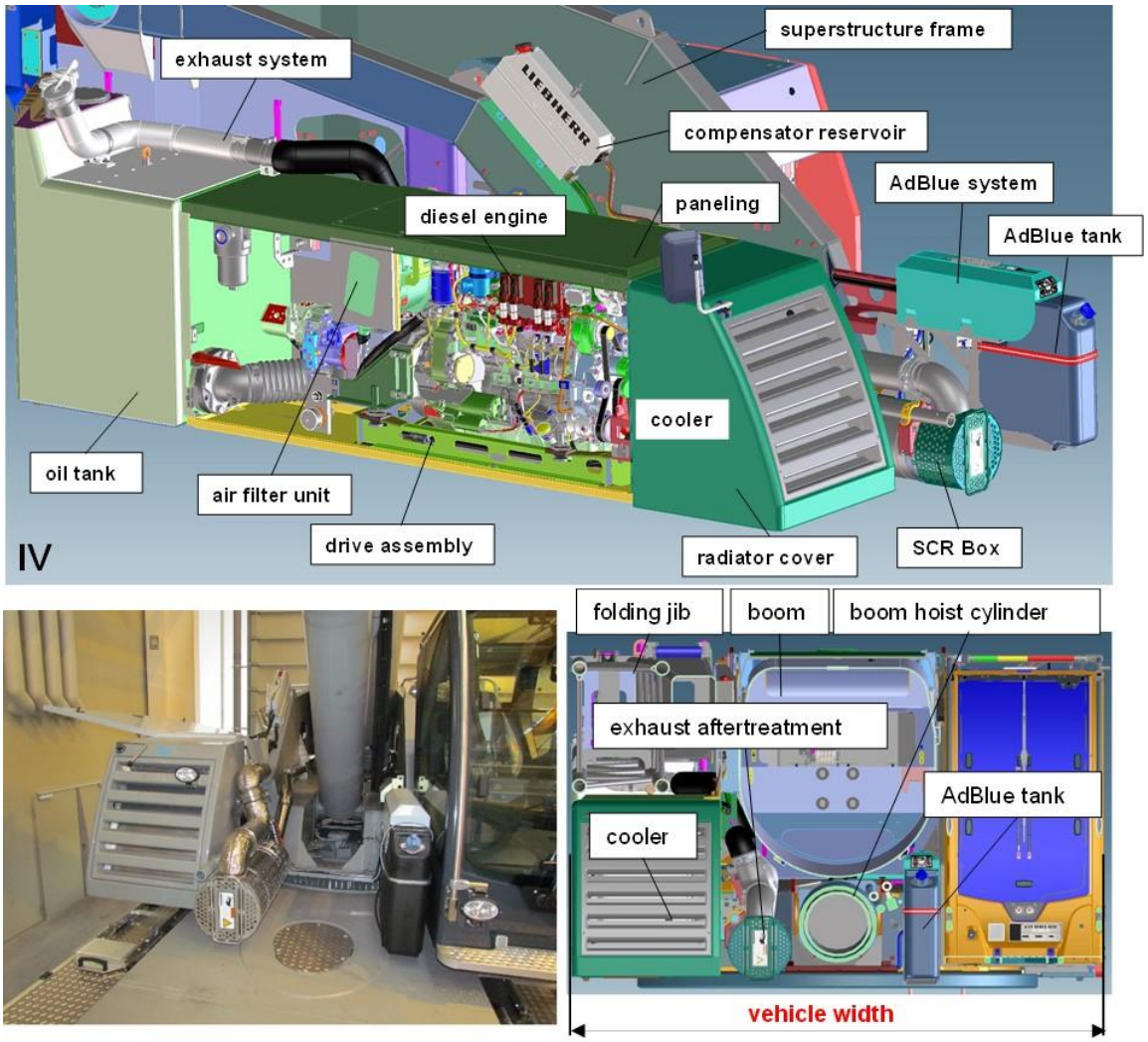

Figure C-8: Installation situation at an AT-crane superstructure for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV

The increased urea tank for space reasons had to be positioned at the right beside the luffing cylinder. Due to the alteration of the injection system the hydraulic and electric installation again had to be altered. Because of the new position of the climate compressor in comparison to Stage III B also a new engine suspension was necessary. Also a changed turbocharger and a repositioned exhaust gas connection with exhaust gas flap provoked again alterations at the steel construction of the superstructure and necessitated new structural calculations. The necessary space as also the increasing weight creates large difficulties for the adaption of the new exhaust gas stages at the superstructure.

C.3 Design alterations at AT-crane carrier with four axles due to new engine systems of the Stage III B and Stage IV

Figure C-9 shows exemplarily an AT-crane with four axles at which below the alterations at the engine system and the consequentially resulting design adaptions at the carrier are shown.

Figure C-9: View carrier AT-crane, 4 axles, capacity 100 tons

In the above picture the AGN, the cooling system with intercooler as well as the position of the urea tank is visible. At the opposite side in the lower picture the engine is shown.

Alterations of the engine system

The engine installed on the carrier of the AT-crane as shown in the Figure C-9 inclusive the AGN of the Stage III A is presented in the Figure C-10. The attainment of the limit values for the Stage III A is achieved by sole engine intern solutions, like an increased intercooling, an increase of the injection pressure as well as an adapted feed start. The exhaust gas pot consists of a spark arrestor and a silencer.

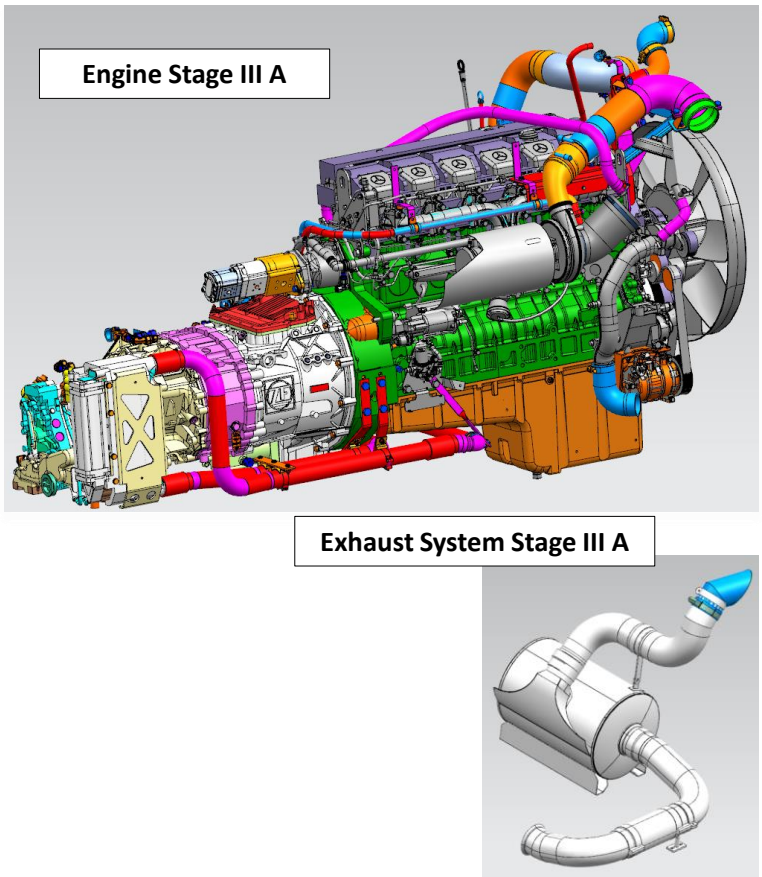

Figure C-10: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A for installation on an AT-crane, four axles

Analog to the engine in the superstructure are at the engine for the carrier sole engine internal measures not anymore sufficient to reach the requested limit values of the Stage III B. As can be seen in Figure C-11, the basic engine of the Stage III B in comparison to the Stage III A remains equal regarding the dimensions, however the weight increases. The exhaust gas aftertreatment system consists of a urea tank, a pump module, an adapted pneumatic facility, a dosing unit, the SCR-catalyser and new exhaust gas tubing with insulation. Additionally the cooling facility was adapted by increasing the amount of heat to be discharged for charge air and cooling water. Supplementary additional cooling water connections for preheating of the urea tank and the pump module have been added.

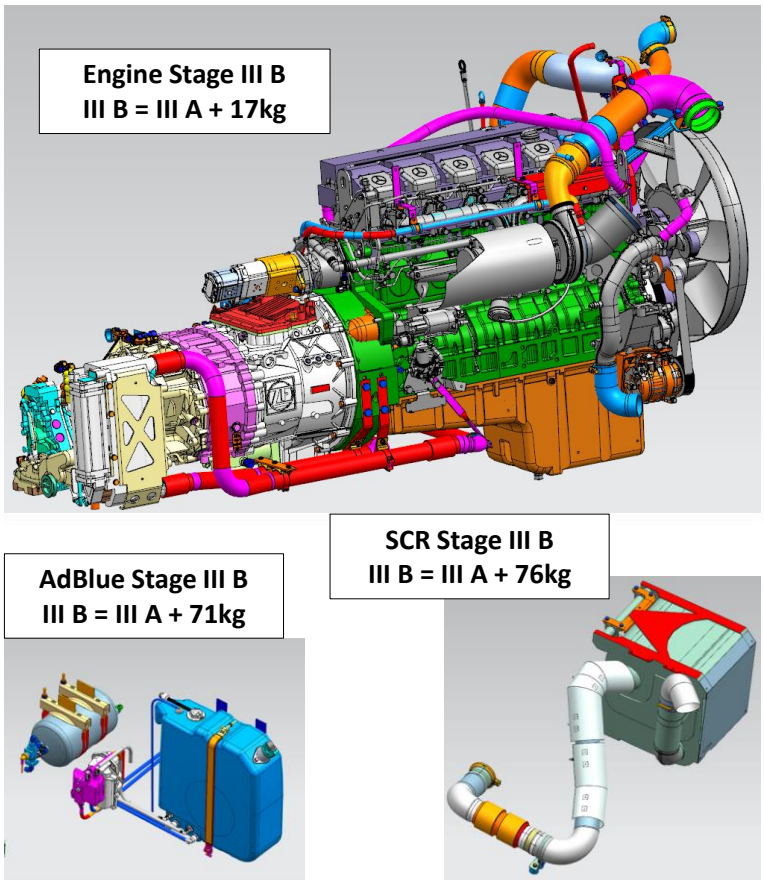

Figure C-11: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B for installation on an AT-crane, four axles

These alterations at the engine system required a larger installation space for the engine peripherals. With the additional weight increase of 164 kg compared to Stage III A in the carrier adaptions at the complete crane became necessary to fulfil all approval regulations.

With the Stage IV a new basic engine with altered components for the SCR-system, as presented in Figure C-12, was introduced. Also the cooling facility was again adapted because the amount of heat to be discharged for charge air and cooling water was again increased. Compared to the Stage III B the weight in the carrier increased by further 173 kg, so that again adaptions at the complete AT-crane became necessary to fulfil the approval regulations.

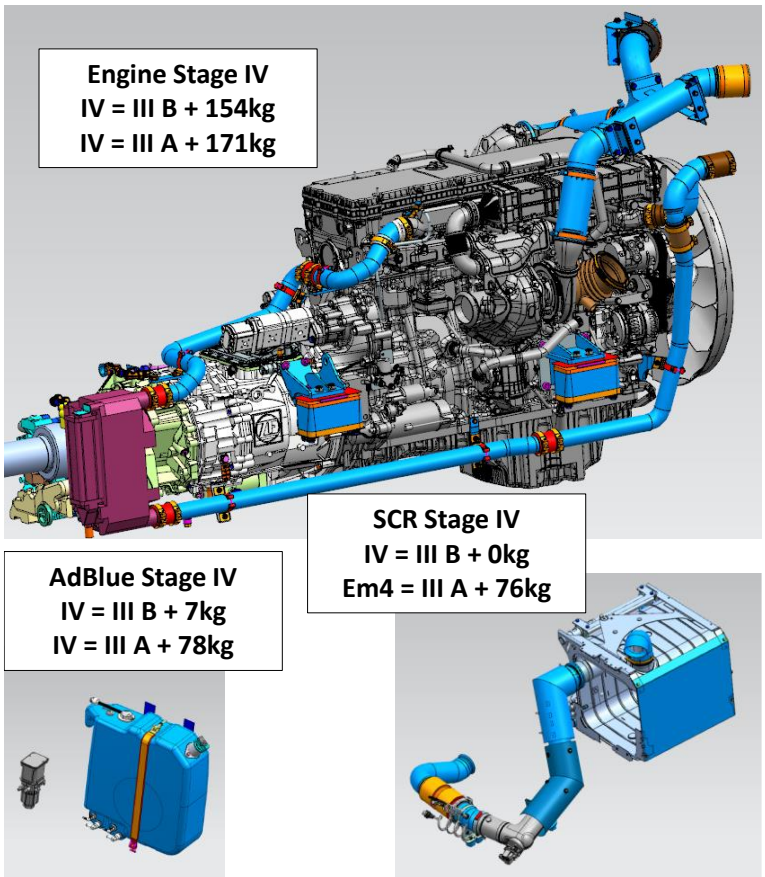

Figure C-12: Engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV for installation on an AT-crane, four axles

Alterations at the carrier

Due to the compact design of the AT-crane the engine at this four-axle carrier is very deeply integrated in the carrier frame. The Figure C-13 shows the typical carrier frame of such a crane. At a four-axle carrier the drive train, consisting of the engine, gearbox, cooling system and engine periphery is installed between the supports. In the Figure the relevant mounting points for the drive train and its periphery are marked as also the cut-out in the side panel for the exhaust gas tubing. The Figure below shows the complete drive train in the now transparently presented carrier frame. Mostly at the beginning of the assembly of the crane the preassembled engine-gearbox unit is installed at the frame.

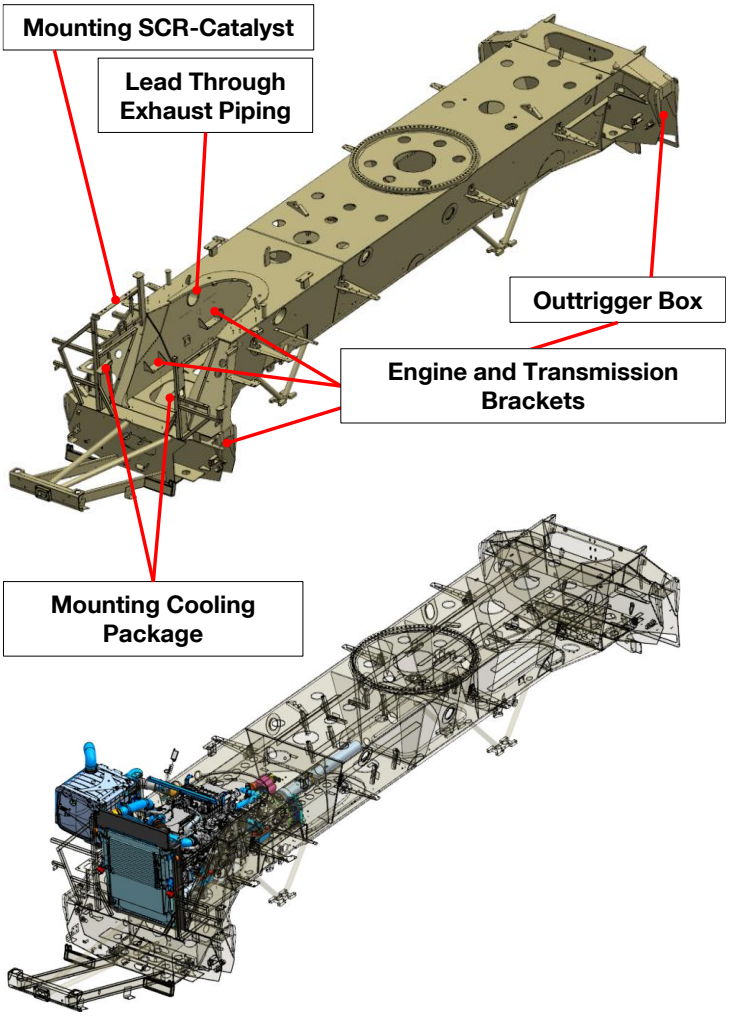

Figure C-13: Engine installation at the carrier frame of a 4-axle AT-crane

Then the installation of the cooling system, consisting of the water cooler, intercooler and condenser of the air condition is carried out. The attaching of the cooling water tubes and charge air lines is the next step. Exhaust gas system and air filter including the piping is only carried out, when the carrier is nearly completed. All this also clarifies the extent of the necessary design alterations when components at the drive train are altered as so far has occurred at all implementations of new exhaust gas regulations.

In Figure C-14 the installation situation at the carrier of the AT-crane with Stage III A is presented. The exhaust gas device, consisting of a silencer with integrated spark arrestor, is installed in driving direction at the right side on the carrier covering. The cooling system, consisting of the water cooler, intercooler and condenser for the aircondition is installed in front of the engine in driving direction and is supplied by a visco ventilator installed at the front end of the crank shaft. In driving direction at the left side beside the engine the hydraulic tank and a hook block storage is mounted.

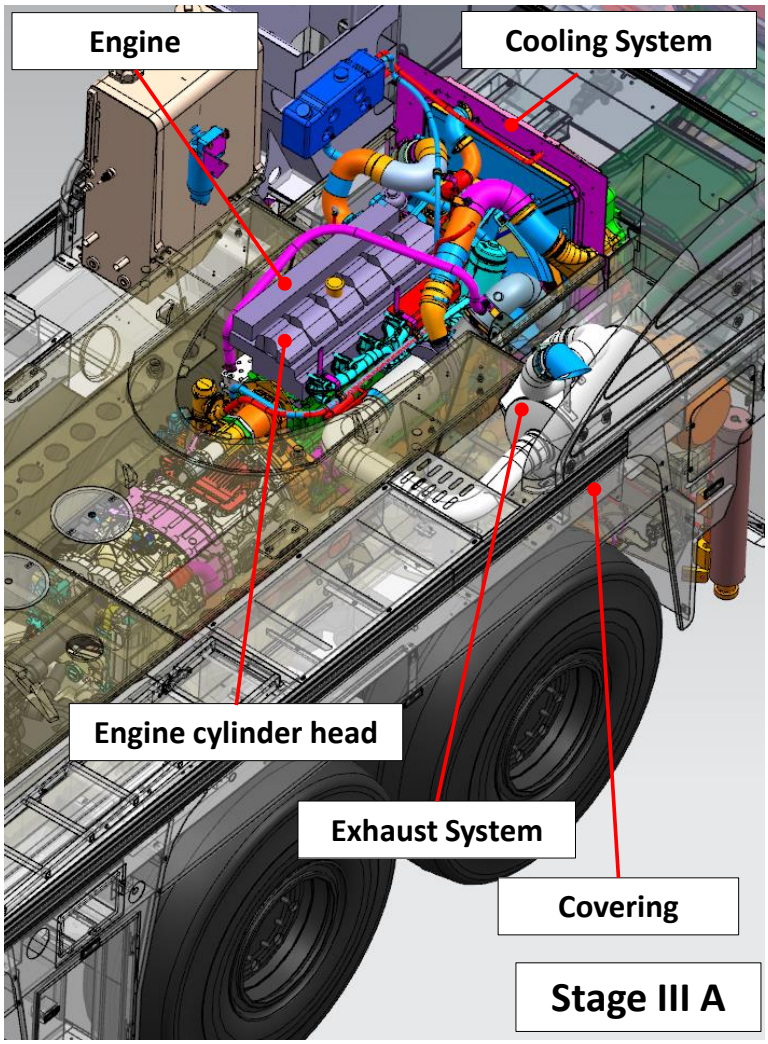

Figure C-14: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III A

Directly behind the cylinder head of the engine the counterweight of the superstructure is placed on the carrier frame for setting up. At the same place this traverses during crane operation by slewing of the superstructure. Thus the installation space for the engine is limited to the back by the counterweight, to the front by the carrier cab, to the left side by the hydraulic tank and to the right side by the silencer.

Figure C-15 shows the installation situation at the carrier of the four-axle crane of the Stage III B. The previously in driving direction right installed exhaust gas aftertreatment is replaced with a SCR-catalyser. The tubing from the engine to the SCR-catalyser must provide a good blending of the exhaust gas with injected urea and serves for a sufficient exhaust gas temperature in the SCR-catalyser. The newly developed exhaust gas tubing needs a straight blending line and an insulation which had not been not necessary up this point.

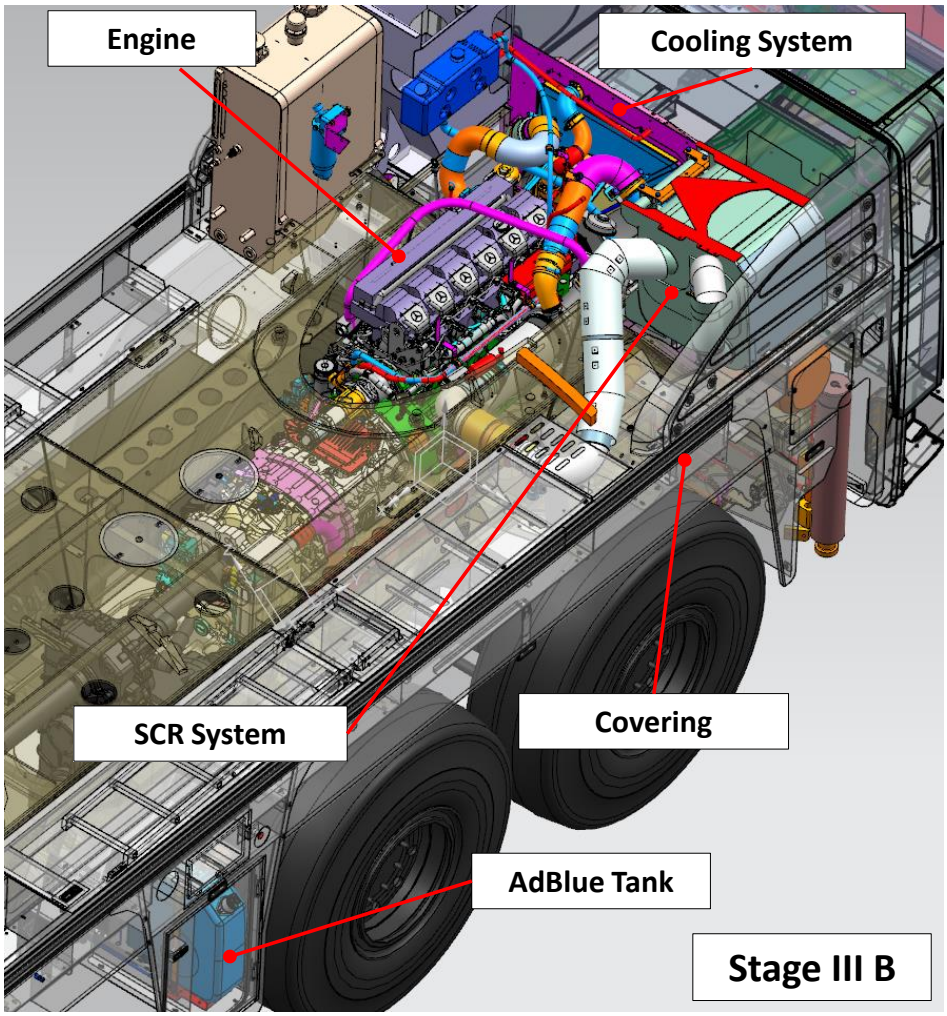

Figure C-15: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage III B

The engine housing and the carrier covering must be altered to accommodate within the available installation space the SCR-catalyser. An alteration of the storage boxes between the axles two and three assures the installation space for the urea tank and the pump module of the SCR-system. Due to the increased cooling power demand and additionally requested water connections for preheating the SCR-system the cooling arrangement had to be altered extensively. Also the pneumatic system has to be altered because the insertion of the urea into the exhaust gas flow is effected by pressured air.

All these measures induce in the carrier an additional weight of 164 kg. As also at the superstructure due to the necessary alterations at the engine an addition weight of 153 kg is generated, the counterweight carried on the carrier must be reduced accordingly for the permissible 12 t axle load configuration. This necessitates a new calculation of the load charts.

In Figure C-16 the engine installation of the Stage IV can be seen. By the now complete new basic engine extensive alterations not only for the engine periphery but also for the load bearing structure of the carrier frame are required. As the engine collides at some places with the frame, alterations at the frame are to be carried out and the function of the structure secured by means of a FEM calculation.

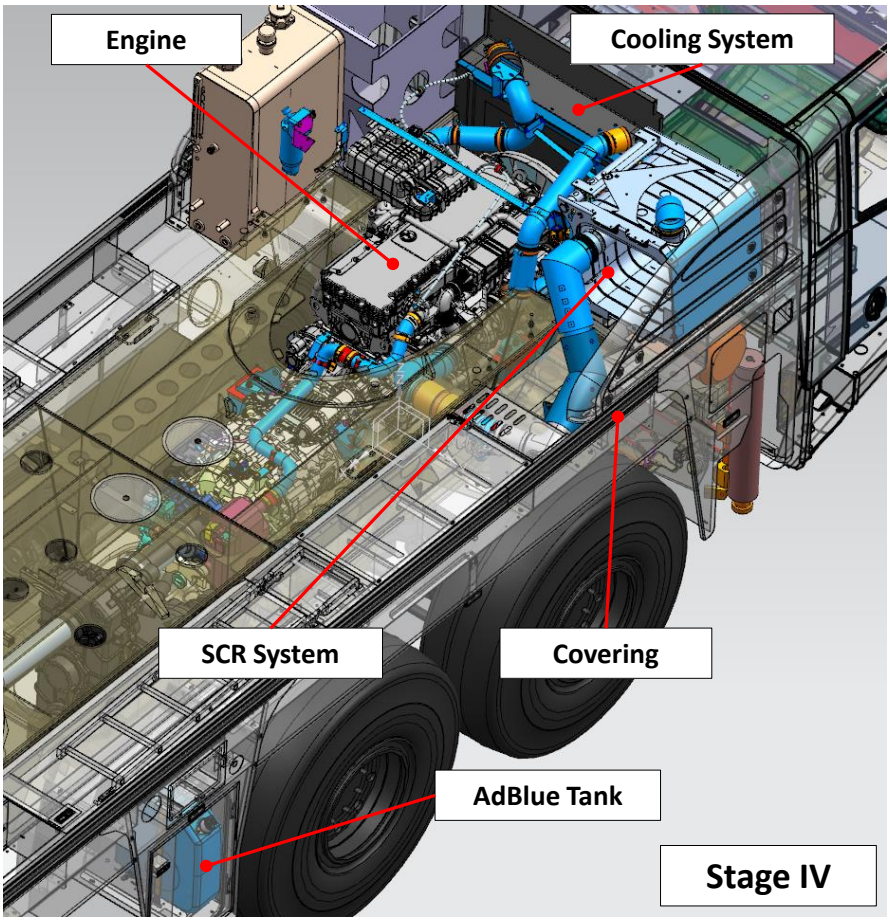

Figure C-16: Installation situation at AT-crane carrier, four axles for engine and exhaust gas aftertreatment system of the Stage IV

The cooling system is completely new as the demands for the engine have changed significantly. In the course of this the maximum permissible cooling water temperature has raised. This means that the components of the liquid cooling must be adapted to the higher temperature level and the accompanying increased operation pressure. Also altered is the exhaust gas tubing because a new dosing of the urea occurs and a new SCR-catalyser is implemented. Also the AdBlue tank and the pump module are new and again must be integrated. The likewise new dosing unit now must be integrated in the exhaust gas tubing. Furthermore alterations at the carrier covering and the storage box between axle two and three unfold. Additionally the engine housing must be redesigned.

The weight increase only at the carrier compared to the Stage III B amounts to 173 kg and compared to the Stage III even to 337 kg. With the additional increase at the superstructure of 133 kg in comparison to the Stage III B with the total weight increases of 306 kg again adaptions at the counterweight are necessary to facilitate the road approval. Also the load charts must be recalculated.

C.4 Design alterations at the AT-crane with five axles due to new engine systems of the Stage III B and Stage IV

With regard to the alterations at the superstructure and the carrier of the previous examples below the implications of the alterations of the exhaust gas aftertreatment at the complete AT-crane are presented. Figure C-17 shows the five-axle crane model contemplated in the following description.

Figure C-17: View AT-crane, 5 axles, capacity 220 tons

Alterations of the engine system

The alterations at the engine system for the installation at the superstructure and carrier for the Stages III B and IV are analog to those in chapter C.2 and chapter C.3. Here however at the engine manufacturer change the engine designs of the Stage IV from a V-type cylinder arrangement to an inline design. A comparison of the designs shows the Figure C-18. By this conversion significantly changed dimensions of the engine unfolded, the width increased by 50 mm, the height by 100 mm and the length by 300 mm. Beside the alterations of the dimensions also the proportions of the engine changed. As can be seen in Figure C.18, the engine of the Stage IV requires signifactly more installation space in the front area than the Stage III B engine.

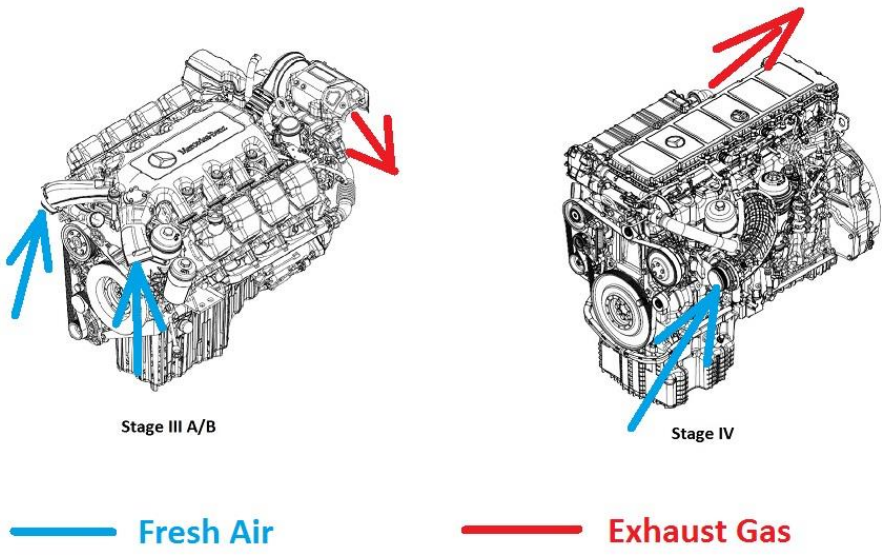

Figure C-18: Comparison engine design and installation space of the Stage III A/B and the Stage IV for installation in the AT-crane carrier

Alterations at the AT-crane

The alterations at the engine and the exhaust gas aftertreatment lead also in this example to numerous adaptions for the arrangement of components at the crane. In Figure C-19 it can be recognised, that the accommodation of the larger exhaust gas catalyser of the Stage III B in the carrier had as a result alterations in the arrangement of the boom parts at the superstructure. To prevent collisions with the new SCR-catalyser the hose drum and the cable drum had to be repositioned further backwards and changed in its positions. Furthermore the SCR-catalyser in driving direction left in comparison to the exhaust gas pot of the Stage III A is positioned now in front of the water cooler. Corresponding alterations had to be carried out at the supply and the discharge lines for cooling water, for hose lines to the hydraulic drive of the ventilator as well at electric lines for the sensors of the cooling system.

Figure C-19: Alterations at the AT-crane due to engine caused adaptions at the carrier of the Stage III B in comparison to the Stage III A

For the carrier and the superstructure further numerous alterations for the information of the driver / operator for crane and driving operations had to be inserted to the software. This include beside others an adaption of the crane control (software) for processing the signals of the exhaust gas aftertreatment (status and error messages, AdBlue level, etc.) as well as an adaption of the display software for the visualisation. Additionally in the driver cab and the crane cab new telltale lights and switches had to be implemented. Certain information regarding the exhaust gas aftertreatment to be transferred visually and acoustically to the driver / operator is prescribed by the legislator and has to be implemented by the manufacturers. With implementation of the Stage IV in the frame of elaborate and time-consuming studies it was determined, that again an adaption of the superstructure for accommodating of an engine and exhaust gas system of the Stage IV would be associated with the following challenge:

- Installation space demand of Stage IV engine is larger than for III A and III B.
- The additional weight of the components can't be compensated anymore.
- Installation guidelines for installation of exhaust gas tubes and catalyser limit further the arrangement of surrounding components of the crane.

For the design of the carrier the following conflicts had to be resolved:

- Accommodation of the larger diesel engine on the carrier.
- Prevention of collision of the new engine with larger installation height on the carrier.

Annex D Calculation model for exhaust gas emissions of all-terrain cranes

For the calculation of the particulate matter of mobile cranes and devices and the road traffic in the past different approaches have established, which at this point are briefly explained. The focus lies in the present study on the calculation of particle and nitrogen oxide emissions, as these particulate matters are more severely regulated by the implementation of the last emission stages and also at the Stage IV.

Existing models and description of the models used

Mainly for the calculation of the particulate matter emission from mobile machines and devices two different approaches exist, which are briefly outlined and confronted in [Hel-2014a]. In the so called Top-Down-Approach the fuel consumptions of a complete sector resp. the machine population is used and multiplied with an emission factor to quantify the mass of the particulate matter emitted. An application of this method and the relevant calculation equation for the sectoral determination of the amount of emission can be found in e. g. [Kle-2012].

Contrary to this is the so called Bottom-up-Approach, at which based on the modelling of the machine population regarding the age and the power classes the relevant exhaust gas legislation stages and the corresponding basic emission factors as per the energy demand are derived from. A very wide spread model, which follows this approach consequently, is the model TREMOD-MM, which was introduced by the ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg in [Hel-2004, Hel-2009], which has been developed especially for the calculation of particulate matter emissions and the fuel consumption of mobile machines and devices and which has been used already in the past frequently in this sector [Hel-2014a, Hel-2014b]. In Figure D-1 the procedure for the grouping of the population and the derivation of the basic emission factor for the use for AT-cranes is presented.

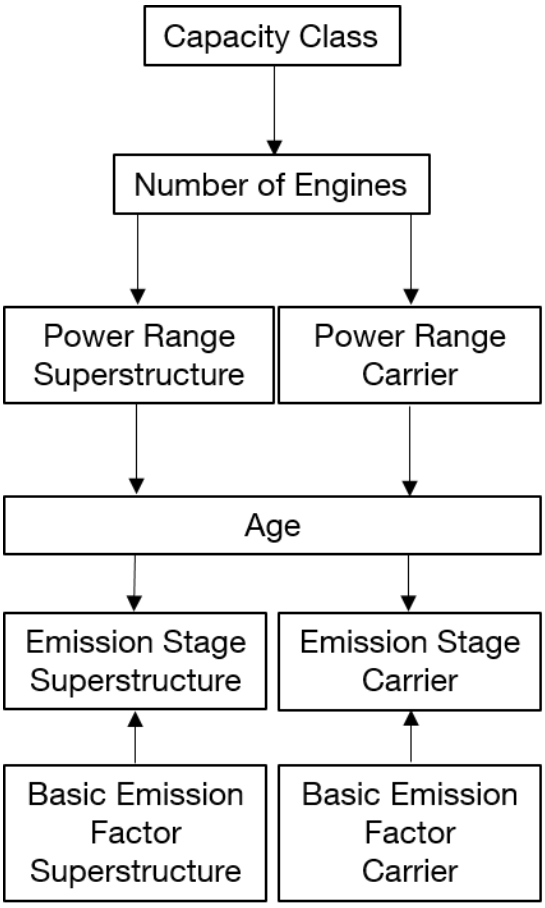

Figure D-1: Procedure for derivation of the basis emission factor for AT-cranes

Starting base for the calculation model is a classification of the crane population according to the maximum capacity, as from this the required drive power for the crane operation and the number of axles of the carrier and thus the required engine power can be categorised. In the next step the classification according to the drive concept is carried out, because at smaller machines up to app. 80 t capacity only one engine is installed, at larger machines however a separate engine is installed at the superstructure. By means of the year of manufacturing resp. the age of the machine the exhaust gas emission stage according to the EU Directive 97/68/EC can be concluded, from which in a further step the basis emission factors can be determined. The calculation of the exhaust gas emission resp. the fuel consumption EMS for the crane population of each capacity class per year is determined by the equation (6-1):

$$EM_S = n \cdot (P_C \cdot Z_C \cdot LF_C \cdot EF_C + P_S \cdot Z_S \cdot LF_S \cdot EF_S) \qquad (6\text{-}1)$$

Herein n marks the number of cranes of this capacity class, *P* the installed engine power, *Z* the accumulated annual operation hours, *LF* represents the load factor and *EF* the emission factor. The indexes relate to the carrier (C) and the superstructure (S), because here different powers and load factors at a crane must be used.

The emission factor results from the energy related based emission factor EF_B, which is increased by a transient adaption factor *TAF* und einem altersabhängigen Verschlechterungsfaktor *DF* and an age related degration factor. The calculation of the emission factors for the carrier (index *C*) and the superstructure (index *S*) is presented in the equations (6-2) and (6-3).

$$EF_C = EF_{BC} \cdot TAF_C \cdot DF_C \tag{6-2}$$

$$EF_S = EF_{BS} \cdot TAF_S \cdot DF_S \tag{6-3}$$

The values for the individual factors, which are the base for the exhaust gas emission inventory as well as the model approach for the population of AT-cranes is introduced below.

Collected data and utilisation of the calculation model

In this chapter the basis data for the exhaust gas emission inventory of AT-cranes supplied by the crane manufacturers in aggregated form and the obtained perceptions from these are presented. Thereby in essence it is a matter of the sales figures of the individual crane types of the last years in the European Union, data regarding the utilisation behavior and data referring to the engine power resp. the setup and operation of the cranes. In Table D-1 the basis data for all manufacturers are presented.

Table D-1: Basis data for the emission inventory

	Value	Unit
Number all-terrain cranes in the EU	19.000	[Pieces]
Load factor carrier	0,25	[-]
Load factor superstructure (two-engine crane)	0,2	[-]
Load factor superstructure (one-engine crane)	0,08	[-]
Annual number of working hours for crane operation	1200	[h]
Annual number of working hours for travelling operation	400	[h]

The actual population data for AT-cranes are inquired from the manufacturers by means of the questionnaire shown in Annex G. Overall a population of AT-cranes of 19,000 units can be assumed, which also serves as the basis value for the calculation. Because the European AT-crane market in essence is a replacement market, in

which old machines are replaced by new ones, for all performed calculations the population is left constantly at 19,000 units. The load factor for the carrier is fixed with 0.25 and verified by means of fuel consumption information from field tests. The same applies for the load factor for the crane operation of the superstructure, which is fixed for small one-engine machines with 0.08 and which is estimated for the two-engine cranes with a value of 0.2. These values are verified by comparisons with measured fuel consumptions. For the determination of the annual working hours for travelling and crane operations the data logger recordings are evaluated and the crane manufacturers queried. The stated values of 1,200 working hours for crane operation and 400 hours for travelling operations can be regarded as maximum values according to the manufacturers. Therewith for each crane within the European Union an annual operation time of 1,600 hours ensues, which approximately corresponds to a one shift operation. The number of operation hours is applied independently of the size or the age of the crane. This assumption is justified by the fact, that most of the mobile cranes are operated by rental companies and the operator has great interest in generating turnover independently from how old the machine is. For deriving of the basis emission factors the age structure for the population must be defined which is used for each calculation year.

Figure D-2 shows the age structure of the AT-crane population according to a cosine approach as is used also in similar way in [Hel-2014]. For the calculations performed here the new entrants of the population are included in full number.

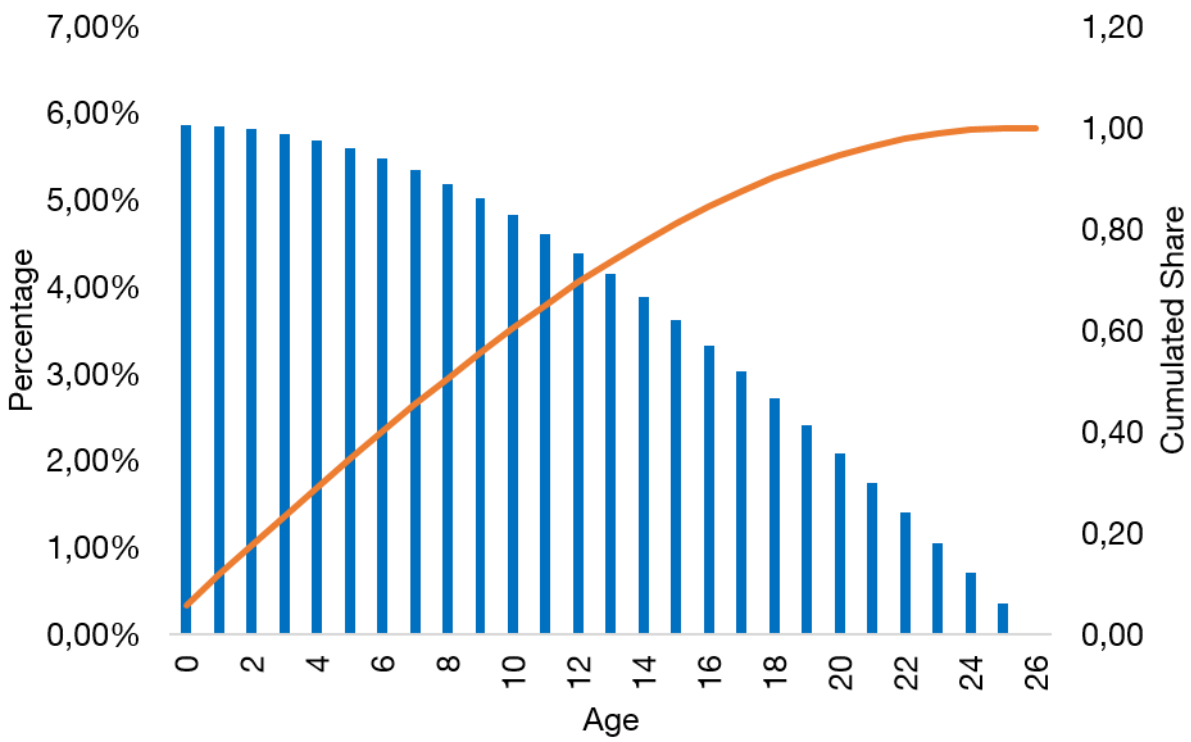

Figure D-2: Age structure for all-terrain cranes in the European Union

The average age within the scope of the present research is assumed with 13 years, so that the oldest machines are significantly older than 20 years. In a further step the classification of the population is carried out to be able to construe the engine power of the machine population. Hereby also the peculiarity of AT-cranes, which from a capacity of app. 80 t are equipped with two engines, is considered. In Figure D-3 the population structure for the determination of the different power classes for the calculation model TREMOD-MM is presented.

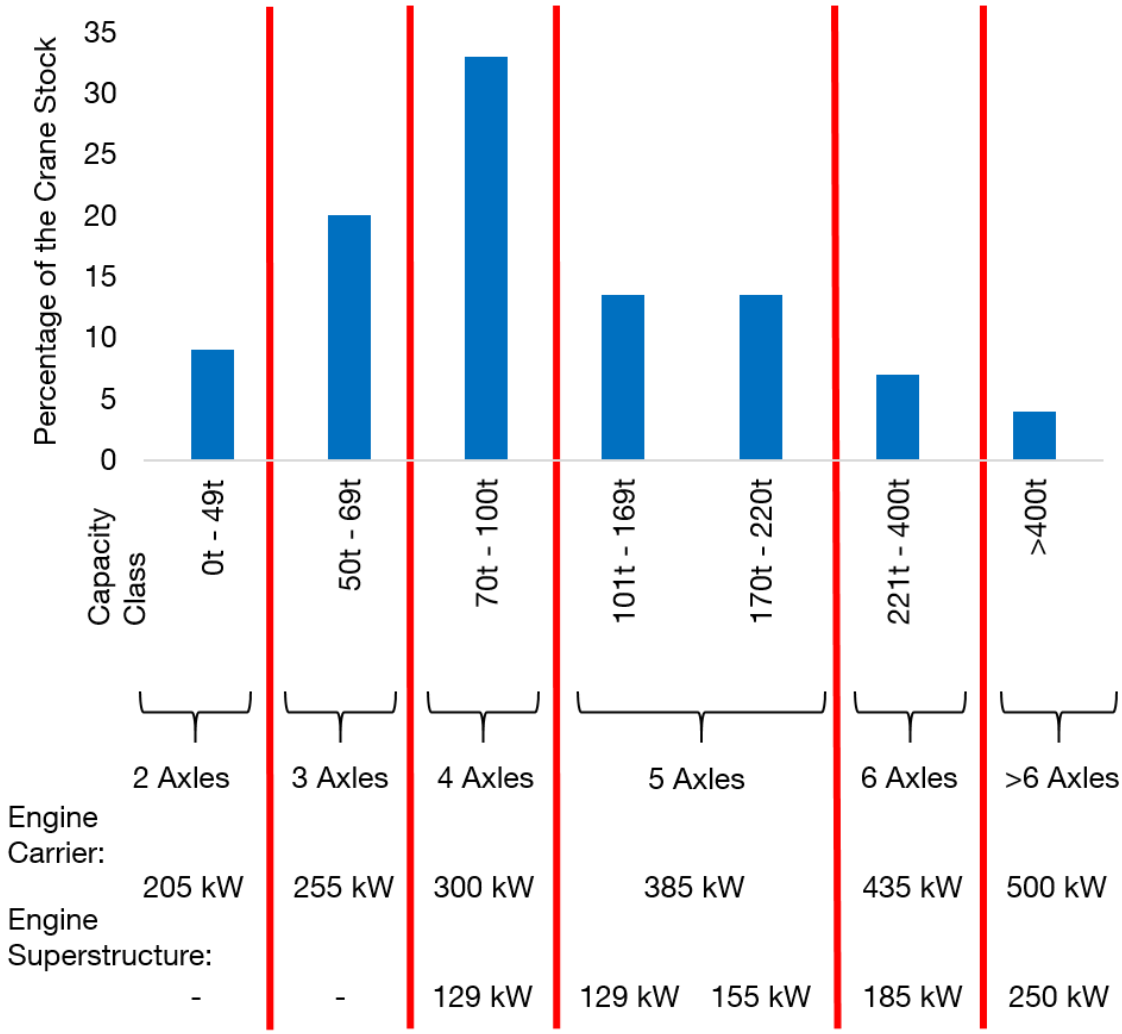

Figure D-3: Population structure of all-terrain cranes in the European Union

As AT-cranes essentially are sold according to their capacity, it seems to make sense to classify these machines in such a pattern and assuming from this to derive at the installed engines and their power. The classification ensues by means of the sales figures from the years 2011 to 2013, from which the population shares of the respective capacity class is determined which is shown in Figure D-3. The category 0-49 t maximum capacity consists of machines with a two-axle carrier and an average power of 205 kW at the carrier, a separate superstructure engine is not used. In the second category from 50 t to 69 t maximum capacities also only single engine machines can be found, which are mounted to a three-axle carrier. From the four-

axle machines for the modelling generally two-engine cranes are determined, whereby the installed engine power at the carrier increase with the total weight of the machine and thus with the number of axles up to 500 kW for the large units with a capacity of more than 400 t. The same applies to the installed engine power at the superstructure, which grow from 129 kW at a four-axle and smaller five-axle cranes up to 250 kW for large machines. In the sector of the five-axle machines two capacity classes are established, as here the power of the superstructure engines significantly differ. Thereby it is considered that with the smaller machines the implementation of the respective next stage of the exhaust gas legislation occurs time delayed. For the presented classification of AT-cranes some assumption are made, which are briefly explained and assessed below:

- As for the classification of the population the arithmetic average from the sales figures of the years 2011 to 2013 is determined, by trend too many large units with corresponding high engine power account for in the population. In reality only in the recent past cranes of this capacity class were developed and sold by all manufacturers. In this regard it is a matter of a Worst-Case-Scenario with the established classification.
- From the four-axle machines generally a two-engine concept is assumed, which is kept for all calculation scenarios. As of late on the market however also concepts for larger cranes with only one engine can be found. Because the number and size of the engines have no influence on the power demand for the crane operation it can be assumed, that the fuel consumption and particulate matter emission behavior don't show serious differences. The calculated emission values are for the selected modelling on a comparable level.
- The actually on mobile cranes installed engines have due to the application of supercharging by trend more power than the engines in the past. For the calculation of the exhaust gas emissions according to the model TREMOD-MM this doesn't play a role as here only the actually demanded power is considered and this result from the work process.

Beside these general assumptions for the population modelling for the calculation model, primarily the basis emission factors, the factors regarding the deterioration and the transient adaption factors are of decisive importance. As the calculation model TREMOD-MM already has been used in multiple studies regarding the exhaust gas emission behavior of mobile machines and devices, a very good data base for these factors exist, which can be resorted to also in the scope of this study. In Table D-2 the used basis emission factors EF_B, which are summed up in [Lam-2004] and [Hel-2009], for the particle and nitrogen oxide emission are presented. Thereby a partition in the power classes 75 kW-130 kW and 130-560 kW is neces-

sary, as at the superstructure some engines with a power of 129 kW can be encountered.

Table D-2: Basis emission factors for the emission inventory

	75 – 130 kW		130 – 560 kW	
	NO_x [g/kWh]	PM [g/kWh]	NO_x [g/kWh]	PM [g/kWh]
Up to 1990	11,8	1	12,4	0,8
1991 – Stage I	13,3	0,4	11,2	0,4
Stage I	8,1	0,2	7,6	0,2
Stage II	5,2	0,2	5,2	0,2
Stage III A	3,2	0,3	3,2	0,2
Stage III B	3	0,025	1,8	0,025
Stage IV	0,4	0,025	0,4	0,025
Stage V	0,4	0,015	0,4	0,015

For the Stage V as basis emission factor the values from the proposal for the establishment of the new emission stage are utilised. For the Stage III A the limit values from the Directive 97/68/EC are used. For the fuel consumption, which is included in the calculation as a control value, the basis factors as stated in [Lam-2004] are used.

The deterioration factor numbers the annual increase of the emission of the articulate matter due to the wear of the engine. As the limit values purported in the Directive 97/68/EC resp. its alteration directives from Stage III A already include the deterioration for a specified time frame and the selected basis emission factors for these stages already correspond to the limit values, for these limit values here an increase of the basis emission factor with an additional deterioration factor is waived. From the side of the engine manufacturers in the scope of the conducted survey also was confirmed that the emissions during the endurance limit tests don't degrade, so that it is calculated with the introduced approach. For the exhaust gas emission stages before Stage IIIA the in [Lam-2004] introduced age depending and on the procedure of the US-EPA based projection is used. The relevant sources and data for the derivation can also be taken from [Lam-2004]. In Figure D-4 the selected

projection for the deterioration factor regarding the particle emission for the stages prior to III A are presented.

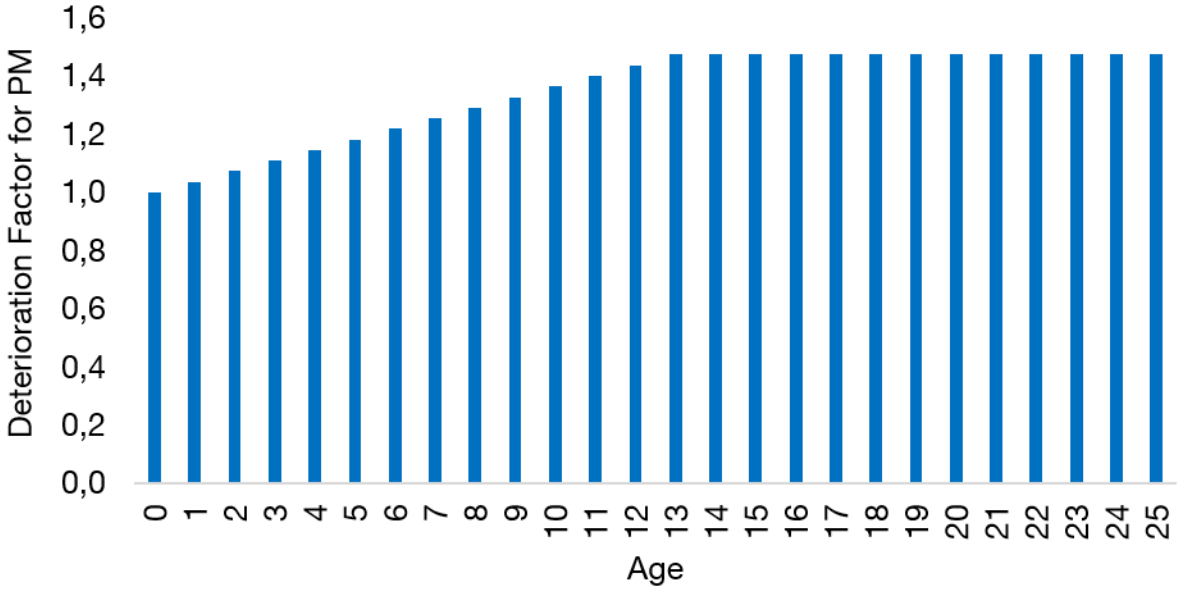

Figure D-4: Deterioration factor for particle emission for the stage prior to III A

The maximum value of the deterioration is in the selected approach at medium life time in this case reached at 13 years. For the nitrogen oxide emission the same approach is selected, but here the maximum deterioration at the medium life time is significantly lower.

Beside the deterioration factor the transient adaption factor is introduced into the model TREMOD-MM, with which it is considered that the basis emission factor up to Stage III A is determined in a stationary cycle, whereas the machine is subjected to a dynamic resp. transient utilisation [Lam-2004]. The derivation in its actual form is based on researches of the US-EPA and the TU Graz, which can be found in [Hel-2014]. Furthermore these factors, which are known only for high load factors (>0, 45) and low load factors (<0, 25) from the mentioned prestudies, are extended by a class for medium loads 0, 25 > LF < 0, 45 by the ifeu-Institut [Hel-2014]. Especially for the travelling of the carrier this class is of importance, as here the load factor is determined at 0.25. The Table D-3 presents the overview for the selected transient adaption factors.

Thereby all basis specifications for the exhaust gas emission inventory introduced in chapter 4 for all-terrain cranes and the projections made in chapter 6.4 regarding the implementation of the Stage V are available in the actual exhaust gas emission legislation.

Table D-3: Transient adaption factors for the emission inventory

	Low Load Factor		Medium Load Factor	
	NO_x [-]	PM [-]	NO_x [-]	PM [-]
Up to 1990	1,1	1,97	1,03	1,6
1991 – Stage I	1,1	1,97	1,03	1,6
Stage I	1,1	1,97	1,03	1,6
Stage II	1,1	1,97	1,03	1,6
Stage III A	1,21	2,37	1,125	1,92
Stage III B	1	1	1	1
Stage IV	1	1	1	1
Stage V	1	1	1	1

Annex E Calculation Procedure of the Trend-Impact-Analysis

The calculation of the Trend-Impact-Analysis benefits analog to chapter 4 the calculation model TREMODD-MM according to [Lam-2004, Hel-2009, Hel-2014a], which is presented in detail in Annex D. With this model, the basis data for the emission factors and the user data determined by the questionnaires the PM and NO_x emissions are calculated.

For the Trend-Impact-Analysis the scenarios (chapter 6.3) as defined for the transition periods for a conversion from Stage IV to Stage V are used and for each scenario the annually accumulated emissions calculated. The observed time frame refers hereby analog to [SWD (2014) 281] to the years 2020 to 2050. From these values for the scenarios 2, 3 and 4 the annually saved mass of particle emission in comparison to the basis scenario 1are calculated and thus the base for the economical evaluation manifested in chapter 6.5.

Annex F Calculation Procedure and Determined Assumptions for the Cost-Effectiveness-Analysis

According to information from the engine Mmanufacturers for AT-cranes with implementation of Stage V a PDF will be added to the SCR-system. On this basis the costs for the implementation of a limit value for PN for mobile cranes according [SWD (2014) 281] will be determined (diesel engine power class 56-560 kW). For all costs and monetary advantages an annual discount rate of 4 percent will be calculated.

Costs

First the determination of the costs for the implementation of the DPF-technology will be performed. This consists of:

a) Costs for engine manufacturers
b) Costs for AT-crane manufacturers
c) Costs for operators

a) Costs for engine manufacturers

Die Europäische Kommission geht im IA [SWD (2014) 281] Annex Table III von DPF The European Commission in IA SD 281 Annex Table III assumes DPF costs per unit of 2,305 € for 75-130 kW; 4,951 € for 370 and 5,958 € for 485 kW. AS in AT-cranes engines from these power classes are installed a medium value of 4,400 € per unit for AT-cranes is adopted.

Furthermore the European Commission assumes only 20 percent of the DPF costs per unit for engines of the power class 37-560 kW for the calculation; because it is assumed that in this field DPF is already predominantly in operation. For AT-cranes this is not the case. As however this technology in the truck field already is successfully in operation, and the utilisation at the AT-cranes must be adapted, in this study it is calculated with 50 % of the DPF costs, 2,200 € per unit. This cost in essence corresponds to the cost estimates of the engine manufacturers from the data acquisition.

Lowering value costs per DPF unit by 20 percent every four years are anticipated. The population of AT-cranes in Europe is constant, so that based on the annual sales figures it is calculated with 1,906 additional DPF units (324 single engine cranes and 791 two-engine cranes).

b) Costs for mobile crane manufacturers

The prognosis of the technical aspects and the related economical consequences (chapter 6.1 and chapter 6.2) has shown, that the effort for the alteration at the AT-crane for implementation of the Stage V will be similar to the conversion to the Stage III B. Thus the costs for the conversion of AT-cranes to Stage V for the mobile crane industry are assumed with an amount of 31.8 million € (cf. chapter 5.3). To this half of the determined storage costs for the two recent conversion stages are added, as the manufacturers further have to preorder and store engines. The sum of 34.06 million € will be presumed as investment for the conversion of all AT-cranes for the mobile crane industry. The amount is spread over the first four years

c) Costs for the operators

Additional costs for the operators due to a DPF are not considered. Although presumably more diesel fuel for the active regeneration of the DPF will be consumed, the engine will be according to the engine manufacturers more efficient, so that the higher fuel consumption will be compensated.

Benefit

Based on the expected reduction of PN the effectivity (benefit) for the environment and health is determined. The total benefit results from the sum of the prevented emissions compared to the BAU scenario during the period under review (cf. chapter 6.4). By multiplication of the annually prevented emissions with a load factor, which stands for the monetary value of the health advantages per prevented ton, the annually saved costs are determined and added up. The prevented damage costs are assumed according to [CEDe-2011] as in IA SWD 281 with 130,000 €/t for $PM_{2.5}$ for the probably applying scenario with a medium influence. As emitted particles from diesel combustion engines in general have an aerodynamic diameter smaller 2, 5 µm [Kle-2012], for the calculation it is assumed, that the savings for the PM as determined in chapter 4.2 corresponds to the savings of the $PM_{2.5}$.

Annex G Questionnaire for the Data Acquisition at the Engine Manufacturers

Introduction	
	The Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) (Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner) at the Technischen Universität München was assigned by the Fédération Européenne de la Manutention (FEM) Product Group Cranes and Lifting Equipment (CLE) Mobile Cranes (MC) to perform a study with the following target: • Demonstration of the technical measures and economical aspects of the conversion of mobile cranes especially at the example of all-terrain cranes (AT-crane) by alterations at the engine for the Stage III A to III B and III B to IV according to the Directive 97/68/EC. • Analysis of the influence of AT-cranes on exhaust gas emissions (PM and NO_x) in relation to construction machines and entire Non-Road-Mobile-Machinery (NRMM) in Europe. • Projection of technical and economical aspects for AT-cranes due to new engines of the Stage V (alterations engine and implication on AT-cranes) as well as influence on the exhaust gas emission. These targets shall be achieved, by beside others collecting information regarding the previous conversions (Stage III A to III B and III B to IV) from the manufacturers by means of questionnaires and interviews. (Further information can be taken from the position paper FEM CLE MC N 0697). **Furthermore a projection for the implementation of the Stage V for AT-cranes shall be performed, Therefore in particular information from the engine manufacturers are necessary. This information shall be collected from you with the following questionnaire.** Please return the filled in questionnaire **latest on the 25.11.2014** to Mrs. Julia Freis: freis@fml.mw.tum.de. For further questions regarding the questionnaire Mrs. Freis (Tel: +49 89 289 15994) is gladly at your disposal as your contact person.
Questionnaire	
A	**Schedule for the implementation of the emission Stage V at engine manufacturers**

	1	At which date will 3D-CAD data of all engines (with periphery and exhaust gas aftertreatment systems), adapted to the installation situation at the different models of the mobile cranes, be available?
	Due date „Design Freeze“ for the complete hardware (dd.mm.yyyy):	
	2	AT which date are C-samples and D-samples of all necessary engine types (with exhaust gas aftertreatment system, hardware, software and diagnosis) for mobile cranes available?
	Due date delivery C-samples (dd.mm.yyyy): Due date delivery D-samples (dd.mm.yyyy):	
	3	AT which date the serial delivery of all engine types (certified) for mobile cranes will take place?
	Due date serial delivery certified engines (dd.mm.yyyy):	
B	**Alteration of the engine Stage V compared to the Stage V** (for the engine block, emission reducing equipment, communication interface and possible other control units)	
	4	Please describe the alterations:
	Alterations of the engines for the AT-cranes incl. components (turbo charger, intercooler, injection system, AGR-system, cooling system): Alterations at the emission reducing equipment (What is new and what will be changed and how?): Alterations weight „engine“ incl. exhaust gas aftertreatment as certified system: Alteration installation space / volume / dimensions „engine“ incl. exhaust gas aftertreatment as certified system: Restrictions for the installation „engine“ incl. exhaust gas aftertreatment as certified system: Do differences exist regarding the engines (incl. periphery and emission reducing	

	equipment) for the installation and use at the superstructure for crane operation and carrier / chassis for the travelling operation? (keyword: DPF active / passive):	
	5	Costs of the emission Stage V
	Which price difference in € per unit (additional costs) exist between the engines of the Stage IV and the Stage V for the following power classes: These data are required to be able to estimate the costs which ensue at the engine manufacturers for the conversion from exhaust gas Stage IV to V (in accordance to the Impact Assessment of the European Commission SWD (2014) 282). app. 129 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 155 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 185 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 205 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 250 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 300 kW _____ price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 385 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 435 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV app. 500 kW _____ € price difference / additional costs for Stage V in comparison to Stage IV	
C	**Further aspects**	

	6	By how many percent increases the fuel consumption of engines of the Stage V (for e. g. DPF) in comparison to Stage IV?
	7	Deteriorates the exhaust gas emission behavior in dependence from the exhaust gas limit values of the different stages (97/68/EC) regarding PM and NO_x during the service life of the engines significantly (keyword: deterioration factor)?
	If yes, which factors for the annual deterioration factors can be charged according to the exhaust gas emission stages for Stage I to Stage V? Stage I: _____; Stage II: _____; Stage IIIA: _____; Stage IIIB: _____; Stage IV: _____; Stage V: _____;	
	8	How many engines do you deliver annually to manufacturers of mobile cranes and in particular of AT-cranes in Europe, in relation to your total production of diesel engines? Share in % for mobile cranes: Share in % for AT-cranes:

Annex H Questionnaire for the Data Acquisition at Crane Manufacturers

Contents

A EU mobile crane industry and global market

To increase the understanding for the impacts on the design of mobile cranes by alterations of the engine in the study the function, setup and fields of operation of mobile cranes shall be explained as well as the diversity of different types and setup conditions presented. At first an overview of the EU mobile crane industry (economical data) shall be given and the mobile crane presented in its function and variation (in combination with the engine). Subsequently the global market for mobile cranes as well as the resulting demands for the manufacturers is illustrated. At last all aspects of the scheduling for the conversion of all stages of the Directive 97/68/EC is shown (engine 129-560 kW and machine).

Economical data for introduction of the sector:

1) What is the share of the AT-cranes in relation to other mobile crane versions (rough-terrain crane, crawler crane, truck crane) in your company?
2) What is your world market share for mobile cranes for your company?
3) What is the turnover of the division mobile cranes and how has it developed? (turnover in million € and % for 2011, 2012, 2013)
4) How high is he R+D expenditure quota (share expenditures for R+D in relation to the turnover) in the division's mobile cranes?
5) What is the number of employees in the product group mobile cranes in your company?
6) How many different crane types contain your product spectrum (of which how many types of AT-cranes)?

Technical data for understanding the setup, the function and the operation profile:

7) What are the typical fields of operation and functions of AT-cranes (when, where, what and for how long)?
8) Which crane type is in particular representative for the representation of the alterations at the crane required by the exhaust gas legislation? An example should be picked and clarified with pictures and drawings (in particular the installation space engine at carrier and superstructure). This example will be

	taken up for the presentation of the impacts (on other subassemblies, connections, cable harness, etc) at alterations of the engines and exhaust gas aftertreatment system (appraisal of the impacts of the conversions from Stages IIIA to IIIB and IIIB to IV). 9) Which requirements / (EU-) guidelines are furthermore to be observed for alterations at the crane (due to the new engine), like road approval, safety, etc.? 10) Which alterations ensue at the engines and exhaust gas aftertreatment system of the Stage I, II, IIIA, IIIB and IV (are pictures for clarification of the alterations and the extent available?) **Market economy data:** 11) Investment volume for AT-cranes (app. between 300.000 and 20 Mio €)? 12) How many and which crane types have been delivered 2011, 2012 and 2013 (divided in EU and rest of the world)? 13) Which differences exist for the sale between regulated and nonregulated markets? Where are the obstacles and where do obstacles / market barriers persist? a. Political / legal regarding laws and Directives b. Technical (availability of low sulphur fuel, AdBlue,) 14) What is the turnover volume resp. the share of the used crane business for the EU and the rest of the world (in comparison to new cranes)? 15) For presentation of the international (used) crane movements: a. Will used cranes after sale into non EU countries also be reimported into the EU and which obstacles are to be expected due to the legislation? b. Which obstacles exist for the use (not sale) of cranes on different continents, particular for large cranes? 16) How is the residual value of AT-cranes during the life span and how changes it at reimportation into the EU / at fulfilling of the political regulations actual in force in the import country? Which implications unfold from this for the general business?
B	**Exhaust gas emission inventory of mobile cranes in the EU** To demonstrate the environmental aspects (NO_x und PM) of mobile cranes with different exhaust gas emission stages of the engines, the exhaust gas emissions for the population of AT-cranes are calculated and put into relation to construction machines and the total NRMM in Europe. Observed are the Stages I to IV for off-road and additionally compared with on-road machines. Furthermore scenarios are calculated, how the exhaust gas emissions at implementation of Stage V during an observance period of five years develop with a transition period of one year resp. three years. Also the costs in € per saved kg PM of the Stages I to IV

	are calculated and for Stage V forecasted / estimated.
	17) How high do you estimate the population of your AT-cranes in the EU? 18) For estimation of the level of the environmental aspects an estimation of the age structure of the crane population is needed. Rate the percental share of the cranes e. g. below 5 years, from 5 to 10 years, etc. 19) What are the average operation hours, divided for superstructures and carriers and for crane sizes resp. capacities (if crucial)? Do the operation hours vary due to the age resp. are they significant lower for older machines? 20) What are the average load factors for superstructures and carriers as per crane size? 21) What is the amount of the growth of the population of AT-cranes in the EU? 22) What is the average life cycle of AT-cranes resp. how is the relation between the outflow of the EU population and the influx?
C	**Evaluation of the impacts of the conversion from the Stages IIIA to IIIB and IIIB to IV** The impacts of the conversion of engines from Stage IIIA to IIIB and IIIB to IV for the AT-crane are illustrated. Thereby the effort for the alteration of the effected subassemblies for alterations at the engine (size, connections, exhaust gas after-treatment system, cooling system) in the development, design, testing, approval production planning etc. shall be presented. Additionally the costs for these efforts and the utilisation of the resources like the workforce, which is engaged with the conversion, for each speciality department, production capacity, test areas, capital (storing costs, related costs) shall be shown. Furthermore the time aspects are contemplated, i. e. which and how many crane types are converted in which time frame (comparison with the initial planning of the Directive and impact flexibility system and sell-off stock).
	Technical aspects of the conversion: 23) Which technical consequences for the AT-crane have resulted from the alteration of the exhaust gas limit values (re-space / weight / CoG / cooling system / AddBlue / availability of fuel and additive etc.)? Detailed description / visualising of the effected subassemblies by means of pictures and drawings of an example for the complete revision (therefore the example from A.8 should again be picked up). **Time aspects of the conversion:** 24) How long has the conversion of the crane types taken for the respective stages? (comparison of the initial planning with the actual conversion) 25) How many types could be converted in which time frame? Which time influ-

	ence had „nonready“ engines resp. altered prototypes? 26) When were new engines (in comparison to the initial planning) available and were these technically mature? 27) Where and when are resp. were AT-cranes not available due to problems in connection with the engine? **Market and economical impacts of the conversions:** 28) Which effort (technical alterations to be carried out, involved speciality departments and the personnel effort in staff days at which cost rate) resulted from the alterations of the crane due to „nonready“engines? (Re-design of the cranes according to unfinished engine designs, changes of prototype engines or pre-series and series models). 29) Which total expenditure unfolded for the alterations of the crane per type? a. Expenditure of the involved speciality departments (development, design, approval, testing, production planning, production commencement, production, etc.) in hours with the relevant cost rates, b. unitisation of the resources staff, which is / was engaged with the conversion per speciality department (number of employees for the conversion in relation to the total number of employees of the speciality departments) in the single phases of the conversion, c. utilisation of the trial and production areas, production capacity, d. storage costs and fixed capital for preordered engines and e. any further expenditure and the impacts in connection with the engine alteration like quality problems (reworking time in comparison to the production time), safety aspects due to the limited testing times, spare parts and their availability etc. 30) Which market impacts resulted from the alterations for the manufacturers (qualitative statements regarding the innovative ability, global competitiveness, etc?) 31) Which impacts unfold for the users? Qualitative statements regarding the impact on the investment activity (planning and investment security), supply / replacement spare parts; unavailability of cranes etc. due to engine aspects?
D	**Estimation of the impacts of the conversion from Stage IV to V** Based on the actual status and the experiences made analog to the area C shall in the interview Directives the • technical impacts / alterations (consultation with the engine manufacturer), • time impact (how much time presumably will the conversion of all crane types require and how is the resources utilisation regarding the staff) and • economical impacts (costs for effort and new technology - market: availability of cranes and losses of turnover – EU-company: loss of jobs, competitiveness and innovation capacity) be projected.

	In particular shall be highlighted, that a conversion as actually planned technically is impossible resp. feasible, as the specified assumptions are not applicable for mobile cranes.
	32) Estimate the market and economical impacts for a transition period of one year (12 months transition time for production commencement and run-up with Stage V engines according to the proposal Implementation of Stage V 97/68/EC for 130 – 560 kW engines) for the period under review of five years. Forecast the conversion plan for the transition phase with estimation of the process of the conversion (first year): a. Which types can be converted in this time frame? b. In which numbers are these types sold resp. what would be here the turnover resp. what would be the amount of loss of turnover due to lack of sales? c. Which impacts result from this (loss of turnover) for the staff resp. how many jobs must be abolished? d. Draft the further process of the conversion for the further four years analog to the aspects a. to c. 33) Estimate the effort for alterations of Stage IV to V based on the queries 29 a. to e. (technical impacts after consultation with the engine manufacturer regarding alterations at the engine) 34) Which negative impacts can be absorbed by a conversion of three years (36 months transition time for production commencement and run-up with Stage V engines)?

Necessary documentation (compile ex ante)

Nr		Due date	Responsible
1	**World market data for 2011, 2012, 2013:** Derived EU-data (what was put into the market in the EU in?)		
2	**Delivery program for 2011, 2012, 2013 world / EU** Related to the types as appropriate (numbers per crane type)		
3	**Schedule, Total time conversion IIIA to III B and III B to IV:** Schedule for the conversion preferably in table form with conducted effort to be able to present the chronological pro-		

	cess for the conversion of each crane type at the manufacturers with personnel days for each speciality department and cost rate - (resources commitment and intensity of staff, space, capital: capacity utilisation development, design, homologation, production)		
4	**Pictures, photographies, 3D-drawings crane and engine:** For visualising of setup and function of the crane and which subassemblies at the crane are affected by alterations at the engine → select an example and exemplify / illustrate		
5	**Overview technical data of all crane types as far as not included in the delivery program** Capacities, number of engines and power classes		

DE

Executive Summary

Mit dem Vorschlag [COM (2014) 581] für eine Änderung der bestehenden Richtlinie 97/68/EG über Emissionsgrenzwerte für Verbrennungsmotoren in mobilen Maschinen und Geräten sieht die Europäische Kommission eine neue Stufe (Stufe V) mit strikteren Grenzwerten für Abgasemissionen vor. Stichtag für die verpflichtende Lieferung der Motoren innerhalb der Leistungsklasse 130-560 kW der Stufe V ist der 01.01.2019. Maschinenhersteller, die diese Motoren in ihre Maschinen einbauen, haben innerhalb einer Übergangsphase ab diesem Stichtag 12 Monate Zeit, ihre Maschinen an die neuen Motoren der Stufe V anzupassen. Bisherige Übergangsregelungen für die Einführung der vorhergehenden Stufen gaben den Maschinenherstellern mehr Zeit zur Anpassung ihrer Maschinen.

Die kürzere Anpassungszeit stellt Hersteller für Fahrzeugkrane vor Probleme. Diese sehen sich aus technischen Gründen nicht in der Lage, ihr vielfältiges Produktportfolio in einem Zeitraum von 12 Monaten auf eine neue Emissionsstufe umzustellen. Die Motoren sind stark in den Maschinen integriert. Das hat zur Folge, dass bei jeglichen Änderungen am Motor und Abgasnachbehandlungssystem die Fahrzeugkrane technisch aufwendig und zeitintensiv umkonstruiert werden müssen. Um sowohl den dafür notwendigen Aufwand für die Fahrzeugkran-Branche als auch den Einfluss auf die Umwelt für die Umstellung auf die Stufe V zu projizieren, wurde zunächst die Umstellung exemplarisch am All-Terrain-Kran von der Stufe III A auf III B und von der Stufe III B auf IV untersucht. Die Daten für die Untersuchung wurden bei den vier größten europäischen Fahrzeugkranherstellern erhoben. Gemeinsam besitzen sie einen Marktanteil in Europa für All-Terrain-Krane von 94 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass es den Hersteller mit ihren vorhandenen Ressourcen bisher in 4,5 Jahren möglich war, ca. 40 All-Terrain-Kranmodelle umzustellen. Maßgebend für die Umstellungsdauer ist dabei der Zeitpunkt, ab wann Serienmotoren, an denen keine Änderungen mehr vorgenommen werden müssen, den Herstellern zur Verfügung stehen. Basierend auf den Erfahrungen sind diese fertigen Motoren ca. 6 bis 3 Monate vor Auslauf der alten Stufe verfügbar. Ab diesem Zeitpunkt benötigen die Hersteller mehr als zwei Jahre, um alle ihre Modelle an die neuen Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme für Ober- und Unterwagen anzupassen. Die Kosten dafür belaufen sich für die Umstellung von Stufe III A auf III B auf 37,76 Mio. €. Für die Umstellung von Stufe III B auf IV werden sich mit Schätzungen der Hersteller bis zum Ende der Umstellungsphase Anfang 2016 56,79 Mio. € ergeben.

Berechnungen zum Emissionsinventar von All-Terrain-Kranen zeigen, dass der Anteil der Population in Europa an den Stickoxid- und Partikelemissionen relativ gering ist. Im Jahr 2020 sind All-Terrain-Krane für einen Anteil von 0,38 % an den Stickoxidemissionen von mobilen Maschinen und Geräten verantwortlich. Gleiches gilt für Partikelemissionen, hier werden im Jahr 2020 All-Terrain-Krane mit 0,57 % zu den gesamten Partikelemissionen von mobilen Maschinen und Geräten beitragen.

Um die Auswirkungen einer Verlängerung der Übergangsphase bei All-Terrain-Kranen auf Umwelt, Gesundheit und Gesellschaft für die Umstellung auf Stufe V zu untersuchen und den dafür notwendigen wirtschaftlichen Aufwand zu quantifizieren, wurden unterschiedliche Szenarien erstellt und verglichen. Dafür wurden zunächst bei drei Motorenherstellern, die 100 % der Lieferanten für All-Terrain-Kranmotoren bei den betrachteten Fahrzeugkranherstellern darstellen, Daten zu den anstehenden Änderungen am Motor und Abgasnachbehandlungssystem aufgenommen. Den Angaben der Motorenhersteller zufolge wird ein Dieselpartikelfilter hinzukommen, der bis heute bei keinem Motor für europäische Fahrzeugkrane zur Abgasnachbehandlung eingesetzt wird. Das Volumen des bestehenden Abgasnachbehandlungssystems wird um ca. 20 % steigen und das Gewicht um bis zu 100 kg zunehmen. Der Serienstart der neuen Motoren ist ab Mitte 2018 geplant. Damit stehen den Kranherstellern frühestens Mitte / Ende 2018 fertige Motoren zur Verfügung.

Auf dieser Datenbasis erfolgte die Prognose durch die Fahrzeugkranhersteller für notwendige konstruktive Anpassungen an ihren All-Terrain-Kranen. Um die geschätzten Änderungen durchzuführen, wäre laut Herstellern ein Zeitbedarf von ca. drei Jahren ab der Verfügbarkeit der Serienmotoren für die Umstellung auf Stufe V notwendig. Da sowohl der konstruktive Aufwand als auch die dafür benötigte Zeit ähnlich hoch wie bei der Umstellung von Stufe III A auf III B geschätzt werden, gehen die Unternehmen von einer ähnlichen Kostenbelastung i. H. v. 34,06 Mio. € aus.

Folgende Szenarien wurden auf Grundlage der Prognose der Hersteller erstellt, um die Auswirkungen dieser Szenarien auf Umwelt und Gesundheit / Gesellschaft im Rahmen einer Trend-Impact Analysis und Cost-Effectiveness Analysis für den Zeithorizont 2020 bis 2050 zu berechnen und zu vergleichen:

Szenario 1: Business-As-Usual-Szenario (BAU) ohne Einführung der Stufe V, dient als Vergleichsgröße für die folgenden Szenarien mit Einführung der Stufe V.
Szenario 2: Einführung der Stufe V mit einer vorgeschriebenen Übergangsphase von 12 Monaten gemäß [COM (2014) 581] und einem Umstellungszeitraum im Idealfall von 12 Monaten mit dem Ergebnis, dass ab 2020 nur Krane mit Stufe V in der Europäischen Union verkauft werden.
Szenario 3: Einführung der Stufe V mit einer Übergangsphase von 36 Monaten für Fahrzeugkrane und einem Umstellungszeitraum im Realfall von 36 Monaten mit dem Ergebnis, dass ab 2020 ein Drittel der Krane mit Stufe V und zwei Drittel mit Stufe IV

in der Europäischen Union verkauft werden; ab 2021 zwei Drittel der Krane mit Stufe V und ein Drittel mit Stufe IV; ab 2022 alle Krane mit Stufe V.
Szenario 4: Einführung der Stufe V mit einer vorgeschriebenen Übergangsphase von 12 Monaten gemäß [COM (2014) 581] und einem Umstellungszeitraum im Realfall von 36 Monaten mit dem Ergebnis, dass ab 2020 ein Drittel der Krane mit Stufe V und keine mit Stufe IV in der Europäischen Union verkauft werden; ab 2021 zwei Drittel der Krane mit Stufe V und keine mit Stufe IV; ab 2022 alle Krane mit Stufe V. Nicht umgestellte Kranmodelle sind in den Jahren 2020 und 2021 nicht verfügbar.

Die Berechnungen der Trend-Impact Analyse über die Auswirkungen auf die Umwelt zeigen für die Szenarien, dass die Dauer der Übergangsphase für die Einführung der Stufe V erhebliche Auswirkungen hinsichtlich der Emissionen haben kann. Bei einem zu kurzen Zeitraum, wie in Szenario 4, können bis zum Ende der Übergangsphase nicht alle Maschinen umgestellt und somit nicht verkauft werden. Dies führt dazu, dass alte Maschinen mit einem höheren Schadstoffausstoß nicht durch neue ersetzt werden und länger im Bestand bleiben müssen. Kurzfristig würden die Emissionen somit zu Beginn der Stufe V sogar steigen. Diesen Sachverhalt bestätigen die für jedes Jahr berechneten Partikelemissionen. Diese liegen im Jahr 2020 für Szenario 2 bei 347 t, das entspricht einem Anteil von 0,57 % an den gesamten Partikelemissionen von mobilen Maschinen und Geräten, für Szenario 3 sind es 348 t mit einem Anteil von ebenfalls 0,57 % und für Szenario 4 sind es 366 t mit einem Anteil von 0,61 %. Die Unterschiede zwischen einer Übergangszeit von drei Jahren, verglichen mit einem Jahr, sind nur marginal. Schlussendlich wird bei allen Umstellungsszenarien dasselbe geringe Partikelemissionsniveau von 18 t im Jahr 2050 erreicht.

Durch die stetige Reduktion von Partikelemission aus Dieselmotoren werden weitere Quellen für Partikelemissionen wie Reifenabrieb, Bremsenverschleiß, etc. in der Zukunft die dominierenden Emissionsquellen darstellen. Schon heute weisen bei einem modernen All-Terrain-Kran mit der Stufe IV die Feinstaubemissionen aus dem Reifenverschleiß einen ähnlich hohen Wert auf wie die motorisch bedingten Feinstaubemissionen aus dem Fahrbetrieb.

Die Cost-Effectiveness Analyse zeigt, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Einführung einer Emissionsstufe V bei All-Terrain-Kranen für die Szenarien 2, 3 und 4 mit über minus 70 Prozent negativ ist. Die Kosten von 66 Mio. € entstehen hier bei den Motoren- und Fahrzeugkranherstellern. Der generierte Nutzen entsteht durch die Vermeidung von ausgestoßenen Luftschadstoffen. Der konkrete Nutzen wird hier durch die vermiedenen Gesundheitskosten der Gesellschaft, verursacht durch Partikelemissionen, dargestellt. Dieser Nutzen für die Gesellschaft ist mit 17 Mio. € für Szenario 2 und 16 Mio. € für Szenario 3 sowie mit ca. 6 Mio. € für Szenario 4 im Verhältnis zu den entsehenden Kosten relativ gering. Zu erkennen ist jedoch, dass der Zeitraum für die Übergangsphase wie bei Szenario 4 einen hohen Einfluss auf den gesellschaftlichen Nutzen hat.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis VII

1 Einleitung 1

2 Hintergrund 5

2.1 Europäische Fahrzeugkran-Branche 5

2.2 Klassifikation von Fahrzeugkranen 5

2.3 Richtlinie 97/68/EG 6

2.3.1 Spezifische technische Probleme bei der Adaption neuer Motorsysteme in Fahrzeugkranen 9

2.3.2 Spezifische marktwirtschaftliche Probleme von Fahrzeugkranen in Verbindung mit Emissionsregulierungen 11

2.4 Exemplarische Betrachtung des All-Terrain Krans für weitere Analysen 13

2.4.1 Spezieller Aufbau von All-Terrain-Kranen 13

2.4.2 Spezieller weltweiter Einsatzzweck von All-Terrain-Kranen 15

3 Methodisches Vorgehen 17

3.1 Datenerhebung 17

3.2 Berechnungsmodell für Abgasemissionen von All-Terrain Kranen 18

3.3 Ansatz zur Folgenbewertung und Projektion 20

4 Abgasemissionsinventar 23

4.1 Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen 23

4.2 Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen 26

5 Folgenbewertung der Umstellungen Stufe III A auf III B und III B auf IV 31

5.1 Technische Aspekte der Umstellungen 31

5.2 Zeitliche Aspekte der Umstellungen 33

5.3 Ökonomische Auswirkungen der Umstellungen 37

6 Projektion für die Umstellung Stufe IV auf Stufe V 41

6.1 Prognose technischer und zeitlicher Aspekte einer Umstellung auf Stufe V 41

6.1.1 Anpassungen am Motor und Abgasnachbehandlungssystem 41

6.1.2 Auswirkungen der Motoranpassungen auf den All-Terrain-Kran 42

6.1.3 Prognose zeitlicher Aspekte für die Einführung der Stufe V bei All-Terrain-Kranen 47

6.2 Prognose ökonomischer Auswirkungen für die Einführung der Stufe V bei All-Terrain-Kranen 48

6.3 Szenarien-Generierung für die Umstellung auf die Stufe V 49

6.4 Trend-Impact Analysis zur Ermittlung des Abgasemissionsinventars und Bestimmung der Auswirkungen auf die Umwelt für generierte Szenarien 54

6.4.1 Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen der Szenarien im Vergleich 55

6.4.2 Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen der Szenarien im Vergleich .. 56

6.5 Cost-Effectiveness Analysis zur Bestimmung der Auswirkungen auf Gesellschaft und Gesundheit der generierten Szenarien 57

Literaturverzeichnis IX

Abbildungsverzeichnis XIII

Tabellenverzeichnis XVII

Anhang A Technische Ausführung zur Klassifikation von Fahrzeugkranen... A-1

Anhang B Technische Beschreibung zum Aufbau des Unter- und Oberwagens von All-Terrain Kranen B-1

Anhang C Technische Ausführung zur Folgenbewertung der Umstellungen von Stufe III A auf III B und III B auf IV C-1

Anhang D Berechnungsmodell für Abgasemissionen von All-Terrain KranenD-1

Anhang E Berechnungsvorgehen der Trend-Impact Analysis E-1

Anhang F Berechnungsvorgehen und getroffenen Annahmen für die Cost-Effectiveness-Analysis F-1

Anhang G Fragebogen zur Datenaufnahme bei Motorenherstellern G-1

Anhang H Fragebogen zur Datenaufnahme bei Fahrzeugkranherstellern H-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGN	Abgasnachbehandlungssysteme
AGR	Abgasrückführung
AT	All Terrain
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EK	Europäische Kommission
EU	Europäische Union
NO_x	Stickoxide
NRMM	Non-Road mobile Machinery
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
SCR	Selektive katalytische Reduktion

1 Einleitung

Mobile Maschinen und Geräte tragen zur Luftverschmutzung in Europa bei. In 2005 waren Verbrennungsmotoren in mobilen Maschinen und Geräten für 15 Prozent der Stickoxid-Emissionen (NO_x) und für 5 Prozent der Partikelemissionen (PM) verantwortlich. Grenzwerte für den Emissionsausstoß dieser Motoren in Abhängigkeit von der Leistungsklasse sind gegenwärtig in der Richtlinie 97/68/EG festgelegt. Darüber hinaus nennt die Richtlinie für die zunehmend strengeren Emissionsgrenzwerte entsprechende Einführungstermine ab denen eine neue Stufe gilt.

Seit Einführung der Stufe I im Jahre 1999 wurden die Grenzwerte für NO_x- und PM-Emissionen von Motoren in mobilen Maschinen und Geräten bis heute um 96 Prozent reduziert. Das entspricht einer jährlichen Senkung von 6,4 Prozent. Im Vergleich dazu wurden bei den Nutzfahrzeugen mit Einführung von Euro I im Jahr 1993 die Grenzwerte für NO_x- und PM-Emissionen bis heute um 95 Prozent gesenkt, was einer jährlichen Senkung von 4,8 Prozent entspricht. Die Entwicklungen der Emissionsgrenzwerte sind in Abbildung 1-1 dargestellt.

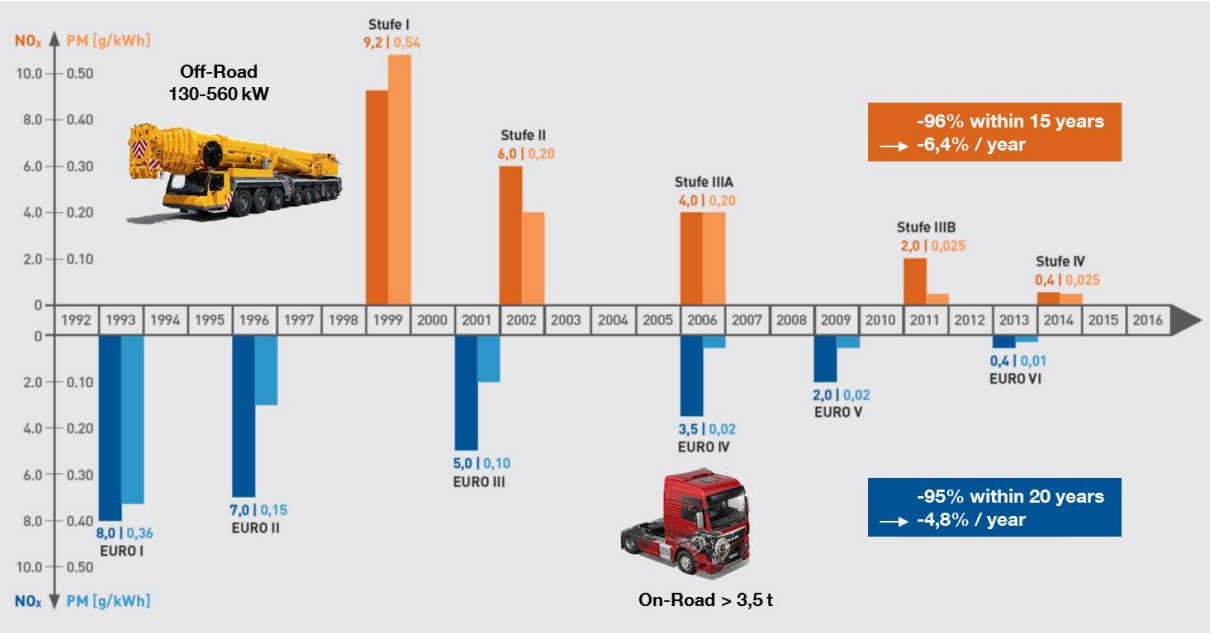

Abbildung 1-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für On-Road und Off-Road in der EU [Bild: VDMA, Liebherr, MAN]

Im September 2014 veröffentlichte die Europäische Kommission einen Vorschlag für eine neue Regulierung der bestehenden Richtlinie 97/68/EG über Emissionsgrenzwerte für Verbrennungsmotoren für bestimmte mobile Maschinen und Geräte [COM (2014) 581].

Hintergrund ist, dass dem relativen Beitrag an luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren, die in den Anwendungsbereich der Richtlinie 97/68/EG fallen, mittlerweile eine größere Bedeutung im Rahmen der Luftqualitätspolitik der Europäischen Union (EU) zukommt [2008/50/EG]. Darüber hinaus wurden weitere wissenschaftliche Erkenntnisse zu gesundheitlichen Auswirkungen von Partikeln gewonnen. Nach Angaben der Europäischen Kommission gewährleisten selbst die in Stufe IV festgelegten Grenzwerte für Motoren in mobilen Maschinen und Geräten keinen angemessenen Schutz vor solchen Schadstoffen. [EK-2013] Somit sieht der Vorschlag [COM (2014) 581] die Einführung einer neuen Emissionsstufe (Stufe V) vor, die in Übereinstimmung mit der Entwicklung im Straßenfahrzeugsektor nicht nur auf Grenzwerte für die Partikelmasse ausgerichtet ist, sondern auch auf Grenzwerte für die Partikelanzahl (PN). Insbesondere soll dieses für Motoren im Leistungsbereich 56 bis 560 kW gelten.

Problemstellung

Mit den vorgeschlagenen, strikteren und für PN-Emissionen neuen Emissionsgrenzwerten in der Stufe V forciert die Europäische Kommission den Einsatz von Dieselpartikelfiltern (DPF). Hersteller von mobilen Maschinen und Geräten stehen somit bei Einführung einer neuen Emissionsstufe wieder vor der großen Herausforderung, ihre Maschinen an geänderte Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme, anzupassen. Davon ist insbesondere die Fahrzeugkran-Branche betroffen, die aktuell die geforderten Grenzwerte ohne einen zusätzlichen DPF einhält. Der Einbau einer zusätzlichen Komponente sowie weitere Änderungen am bestehenden Motor und dem Abgasnachbehandlungssystem führen zu umfangreichen Anpassungen und Neukonstruktionen am Fahrzeugkran [FEM-2014]. Im Unterschied zu anderen mobilen Maschinen ist ein Großteil der Fahrzeugkrane zum Fahren auf öffentlichen Straßen zugelassen. Mit der Straßenzulassung gehen bestimmte Restriktionen wie Abmessungen, Gesamtgewicht und maximal zulässige Achslasten einher, die nach jeglicher Änderung am Fahrzeugkran weiterhin eingehalten werden müssen. Hinzu kommt, dass bei vielen der straßenzugelassenen Fahrzeugkrane zwei Motoren (für Fahr- und Kranbetrieb) eingebaut und von den Änderungen betroffen sind.

Vor dem Hintergrund der kurzen Übergangsperiode von 12 Monaten, die den Originalgeräteherstellern für die Umstellung entsprechend dem Vorschlag [COM (2014) 581] eingeräumt wird, sieht sich die Fahrzeugkran-Branche aus technischen Gründen nicht in der Lage, ihr gesamtes, vielfältiges Produktportfolio bestehend aus 170 unterschiedlichen Krantypen innerhalb dieser 12 Monate umzustellen [FEM-2014].

Zielsetzung der Studie

Ziel der Studie ist eine Darstellung der technischen Umsetzungsprobleme der europäischen Fahrzeugkran-Branche bei der Umstellung ihrer unterschiedlichen Geräte-

typen auf eine neue Abgasstufe und der damit verbundenen Aufwendungen. Im Vordergrund steht eine Projektion für die geplante Umstellung auf Stufe V, mit einer Betrachtung von unterschiedlichen Übergangszeiträumen und den damit einhergehenden ökonomischen und sozialökonomischen Auswirkungen. Dafür wird exemplarisch der straßenzulässige Fahrzeugkran, der sog. All-Terrain-Kran als Untersuchungsgegenstand verwendet. Dieser stellt mit 70 bis 90 Prozent, je nach Hersteller, den größten Anteil der jährlich verkauften Fahrzeugkrane in der EU dar.

Hierfür wird ein Abgasemissionsinventar für All-Terrain-Krane (AT-Krane) erstellt. Darauf aufbauend wird der Beitrag von AT-Kranen, stellvertretend für Fahrzeugkrane an PM- und NO_x-Emissionen im Verhältnis zu gesamten mobilen Maschinen und Geräten dargestellt. Weiterhin werden die Veränderungen der Emissionen bei einer Verlängerung der Übergangszeit für die Umstellung von Fahrzeugkranen untersucht.

2 Hintergrund

2.1 Europäische Fahrzeugkran-Branche

Fahrzeugkrane, auch Mobilkrane genannt, sind Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung der Klasse N 3, die nicht für die Güterbeförderung geeignet und mit einem Kran ausgerüstet sind [2007/46/EC]. Sie können auf Reifen, Raupen oder anderen beweglichen Ausrüstungen betrieben werden (vgl. Abbildung 2-1) und gehören im Off-Road Bereich zu den mobilen Arbeitsmaschinen (NRMM, Non-Road mobile Machinery). Die Rahmenrichtlinie [2007/46/EC] regelt zudem, dass in allen straßenzugelassenen Fahrzeugkranen auch die Fahrmotoren nach 97/68/EG vorgesehen sind.

In der Europäischen Union (EU) hergestellte Fahrzeugkrane werden für den weltweiten Markt entwickelt und produziert. Der Verkauf von in Europa hergestellten Fahrzeugkranen beträgt weltweit nicht mehr als 4.000 Stück im Jahr. Davon werden weniger als 2.000 Stück im europäischen Raum ausgeliefert. Dies umfasst alle Typen der angebotenen 170 unterschiedlichen Fahrzeugkranmodelle der europäischen Hersteller. Im Vergleich dazu ist die Modellanzahl in der Lkw-Branche wesentlich geringer, die Verkaufszahlen je Hersteller mit 60.000 bis zu 460.000 Stück im Jahr aber deutlich höher [VDMA-2014].

Den größten Anteil der am Markt abgesetzten Typen von Fahrzeugkranen stellen die straßenzugelassenen AT-Krane dar. Auf Grund hoher Verkaufszahlen bilden die AT-Krane bei den europäischen Herstellern 70 bis 90 Prozent der abgesetzten Stückzahlen. Im Jahr 2013 erwirtschafteten die vier größten europäischen Fahrzeugkranhersteller einen Umsatz von 2.872 Mio. € mit AT-Kranen und Beschäftigten ca. 5.600 Mitarbeiter. Gemeinsam besitzen die vier größten Hersteller im Jahr 2013 einen Marktanteil im AT-Kran Segment von 94 % in Europa.

2.2 Klassifikation von Fahrzeugkranen

Ein Fahrzeugkran ist gemäß [EN13000:2010] ein Auslegerkran „mit eigenem Antrieb, der mit oder ohne Lasten verfahren werden kann, ohne dass hierzu eine feste Fahrbahn benötigt wird und dessen Standsicherheit durch die Schwerkraft sichergestellt wird“. Er wird weltweit eingesetzt und wechselt oft für seinen Einsatzzweck zwischen unterschiedlichen Kontinenten.

Unterteilt werden Fahrzeugkrane (vgl. Abbildung 2-1) in straßenzugelassene AT-Krane und montierte Krane auf einem serienmäßigen LKW (Autokran), die für das Fahren auf öffentlichen Straßen und am Einsatzort die erforderliche Ausrüstung besitzen und geländegängige Rough-Terrain-Krane und Raupenkrane, die beide auf Baustellen mit Last verfahren werden können.

All-terrain mobile crane | Rough-terrain mobile crane | Crawler crane

Abbildung 2-1: Fahrzeugkrane unterteilt in straßenzulässige All-Terrain Krane, geländegängige Rough-Terrain Krane und Raupenkrane

Im konstruktiven Aufbau bestehen Fahrzeugkrane aus einem Unterwagen, der den Fahrantrieb des Krans beinhaltet und einem Oberwagen, der den eigentlichen Kran darstellt. In festen Arbeitspositionen können sie durch Abstützungen oder andere Vorrichtungen unterstützt werden, die die Standsicherheit erhöhen. Als Auslegersysteme kommen entweder Teleskopausleger, die mit unterschiedlichen Auslegerverlängerungen oder Spitzen erweitert werden können, oder Gittermastausleger zum Einsatz. [EN13000:2010]

2.3 Richtlinie 97/68/EG

Alle Fahrzeugkrane werden mit Dieselmotoren betrieben (s. Anhang A). Für den AT-Kran kommen im Oberwagen Motoren mit Leistungen zwischen 129 und 400 kW und im Unterwagen zwischen 200 und 500 kW zum Einsatz. Dabei entstehen für diese Motorbauart und Leistungsklassen folgende typische Abgasemissionen [DEU-2014]:

- **Kohlenstoffdioxid CO_2:** Gasförmiges Produkt aus der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, wie etwa Dieselkraftstoff. Kohlenstoffdioxid gilt als Treibhausgas und steht im Fokus, zur globalen Erwärmung beizutragen.
- **Kohlenstoffmonoxid CO:** Ein geruchloses aber toxisches Gas, das bei hohen Verbrennungstemperaturen und Sauerstoffmangel bei der Verbrennung entsteht.
- **Stickoxide NO_x:** Treten vor allem als Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) auf, welches u.a. zu Smog beiträgt.

- **Unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC:** Emission durch unvollständige Verbrennung.
- **Feinstaub / Partikelemissionen PM:** Hier sind vor allem Ruß (Kohlenstoff), der durch die dieselmotorische Verbrennung entsteht und verschleißbedingte Emissionen (metallischer Abrieb) sowie wässrige Schwefelsäure zu nennen.

Diese Emissionen, der im Fahrzeugkran verbauten Motoren, müssen vor dem Inverkehrbringen den Vorschriften der Ausgangsrichtlinie 97/68/EG, der Änderungsrichtlinien 2002/88/EG, 2004/26 EG, 2006/105/EG, 2011/88/EG sowie der letzten Änderungsrichtlinie 2012/46/EU entsprechen. Die zulässigen Grenzwerte, zu sehen in Abbildung 2-2, sind in den Stufen I bis IV (Stage, engl.) seit Inkrafttreten der Richtlinie geregelt. Die in der US Gesetzgebung weitgehend harmonisierten Abgasemissionsstufen werden als „Tier“ bezeichnet. Die europäische Richtlinie enthält gleichzeitig ein harmonisiertes Verfahren für das Inverkehrbringen von neuen Motoren der jeweiligen Stufe auf der Grundlage der Typgenehmigung und schreibt die Kennzeichnung der Motoren sowie bestimmte Angaben zu den hergestellten Motoren verbindlich vor.

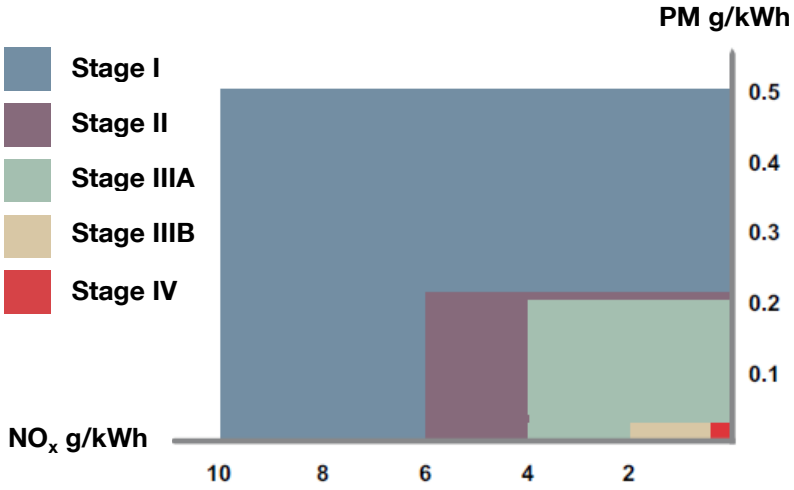

Abbildung 2-2: Emissionsgrenzwerte der eingeführten Stufe in die EU [Vol-2010]

Die Abgasstufen werden schrittweise nach Motorleistungsklassen eingeführt. Die Einführungsdaten für in Fahrzeugkranen verbaute Dieselmotoren im Leistungsbereich 75 bis 560 kW sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Start der Stufe III B ist der 01.01.2011 für 130-560 kW und 01.01.2012 für 75-130 kW Motoren. Stufe IV beginnt am 01.01.2014 für 130-560 kW und 01.10.2014 für 75-130 kW. Die Verschärfung der Emissionsvorschriften für Motoren führt zu geänderten Motorkonstruktionen und zusätzlichen Abgasnachbehandlungssystemen.

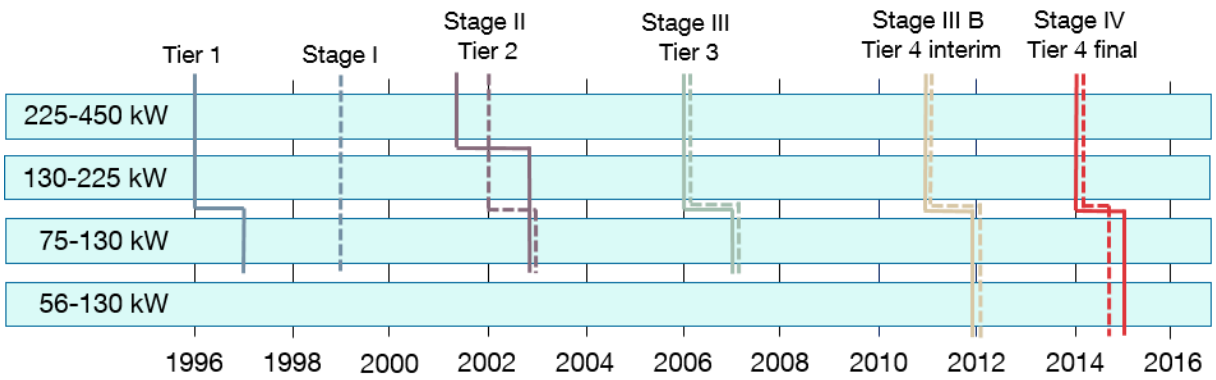

Abbildung 2-3: Einführung der Emissionsstufen nach Motorleistungsklassen in der EU [Vol-2010]

Um Herstellern von mobilen Maschinen und Geräten sowohl die nötige Zeit für konstruktive Anpassungen an ihren Maschinen zu geben als auch Fertigungslinien umzugestalten, zusätzliche Systeme zur Abgasnachbehandlung zu beschaffen oder bestehende Lagerbestände zu veräußern, enthält die Richtlinie in ihrer derzeitigen Fassung verschiedene Bestimmungen, um den Übergang zu den nächsthöheren Stufen zu gestalten. Zu den Maßnahmen gehören die Bestimmung zur Veräußerung von Lagerbeständen, die Bestimmungen zu auslaufenden Serien sowie das Flexibilitätssystem.

Die Übergangsregelung zur Veräußerung von Lagerbeständen sieht vor, dass Motoren, die während einer Emissionsstufe gebaut werden und die Grenzwerte dieser Stufe einhalten, nach Auslaufen dieser Emissionsstufe weiterhin zwei Jahre in Verkehr gebracht werden dürfen. Ausschlaggebend ist das Produktionsdatum des Motors. Dieses muss vor dem Auslaufdatum der Emissionsstufe liegen. Für den Einbau von III A-Übergangsmotoren in Geräte nach Auslaufen der jeweiligen Stufe gilt keine zeitliche Begrenzung. Das gleiche gilt für die Inverkehrbringung von Geräten mit III A-Übergangsmotoren nach Auslaufen dieser Stufe. Ausschlaggebend ist das Produktionsdatum des Motors, welches vor dem Auslaufdatum der jeweiligen Emissionsstufe liegen muss. Für den Einbau von III B-Übergangsmotoren in Geräte sowie die Inverkehrbringung von Geräten mit III B-Übergangsmotoren nach Auslaufen der Stufe III B gilt das gleiche wie für III A-Übergangsmotoren.

Mit der Flexibilitätsregelung wurde den Motorenherstellern bisher erlaubt, während des Zeitraums zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen von Grenzwerten eine begrenzte Anzahl von Motoren, die lediglich die Grenzwerte der vorangehenden Stufe einhalten, für den Einbau in mobile Maschinen und Geräte, in Verkehr zu bringen. [EK-2013], [97/68/EC]

Der am 24. September 2014 veröffentlichte Vorschlag COM (2014) 581 der Europäischen Kommission zur Neuregelung der Emissionsgrenzwerte sieht für die neue Stufe V ab 2019 u. a. Standards für in Fahrzeugkranen verbaute Motoren in den Leis-

tungsklassen zwischen 130-560 kW vor, die weltweit die strengsten sind [COM (2014) 581]. Neu hinzukommen, analog zum Straßenfahrzeugsektor, sind Grenzwerte für die Partikelanzahl sowie weitere Regularien. Das bestehende Flexibilitätssystem zur Regelung der Übergangszeit ist nicht mehr vorgesehen. Dem Vorschlag entsprechend können Maschinenhersteller, wie Abbildung 2-4 zeigt, lediglich in einem Zeitraum von 18 Monaten nach dem Stichtag 1. Januar 2019 letztmalig Maschinen nach alter Gesetzeslage auf den Markt bringen.

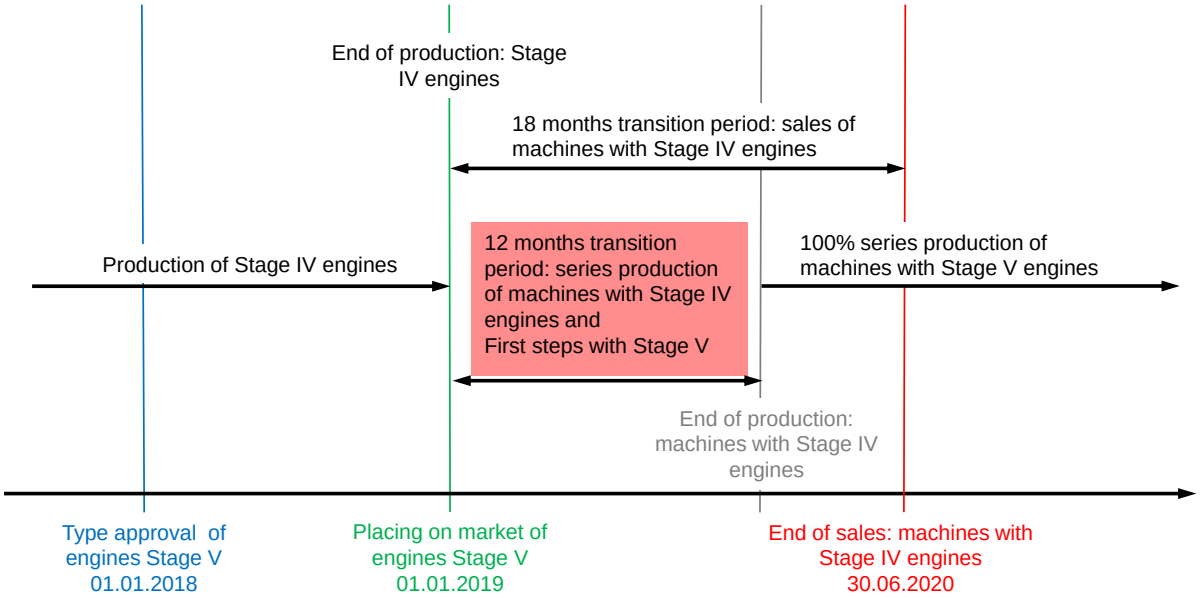

Abbildung 2-4: Vorschlag zur Einführung der Emissionsstufe V für Motoren der Leistungsklasse 130-560 kW in der EU

2.3.1 Spezifische technische Probleme bei der Adaption neuer Motorsysteme in Fahrzeugkranen

Die vorgesehene neue Regelung der Übergangszeit für Stufe V sieht ab dem Stichtag 01.01.2019 das Ende der Produktion von Stufe IV Motoren vor. Danach haben die Originalgerätehersteller 12 Monate Zeit, die neuen Serienmotoren der Stufe V in ihre Maschinen zu integrieren und ihre Produktion für Stufe V Maschinen bis zum erlaubten Ende der Produktion von Stufe IV Maschinen am 31.12.2019 hochzufahren. Der Abverkauf von Maschinen mit Stufe IV Motoren ist bis Mitte 2020 vorgesehen, sofern die Maschinen bis zum 31.12.2019 gebaut worden sind.

Diese Änderung der Übergangszeit stellt, ohne dem aktuell bestehenden Flexibilitätssystem, die Fahrzeugkran-Branche vor die große Herausforderung, ihr gesamtes, vielfältiges Produktportfolio bis Ende 2019 umgestellt zu haben. Nach Angaben der Hersteller ist es jedoch nicht möglich, alle aktuell bestehenden 170 Typen auf einmal umzustellen. Hier sprechen die Hersteller aus Erfahrungen mit den Umstellungen ihrer AT-Krane aus vorhergehenden Stufen. Insbesondere die letzen Umstellungen der Krane von der Stufe III A auf die Stufe III B sowie von der Stufe III B auf

die Stufe IV brachten technische Konflikte bei der Anpassung des Krans an den neuen Motor sowie das neu hinzugekommene Abgasnachbehandlungssystem mit sich. Diese wurden in zeitintensiven konstruktiven Tätigkeiten durch Entwicklungen und Änderungen am Kran mit hohen Aufwänden gelöst. Der Lösungsraum zur Anpassung ist für alle Fahrzeugkrane wegen der Notwendigkeit des Straßentransports sehr eingeschränkt. Neben dem Heben von Lasten ist beim AT-Kran die Genehmigung und Zulassung zum Fahren auf öffentlichen Straßen ein wesentliches Merkmal. Für die europaweite Genehmigung eines Fahrzeugkrans müssen diverse Rechtsakte nach 2007/46/EG eingehalten werden. Die wichtigsten, sich aus der Straßenzulassung ergebenden Restriktionen, für die AT-Krane (vgl. Abbildung 2-5) sind die maximale Höhe von 4 m und die maximale Breite von 3 m, sowie eine maximale Achslast von 12 t (in Deutschland). In dieser Abbildung ist auch die Position der verbauten Motoren zu sehen. Diese sind vollständig in der Maschine integriert und werden schon zu Montagestart in den Rahmen gesetzt und mit anderen Komponenten verbaut.

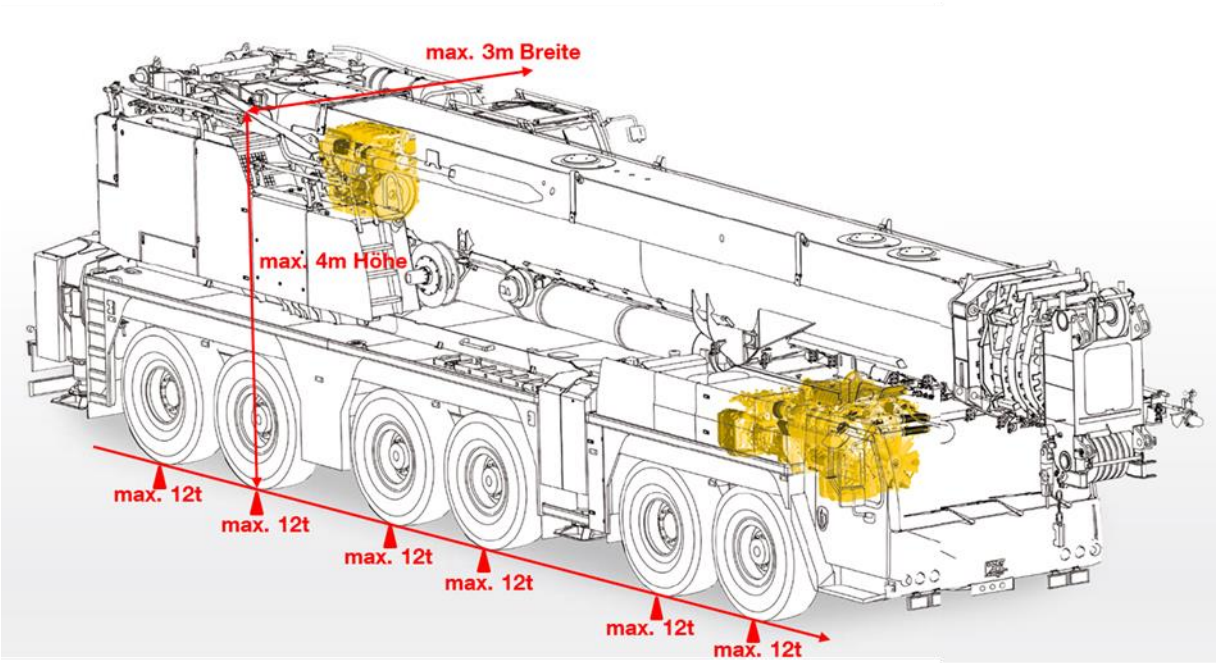

Abbildung 2-5: Restriktionen des AT-Krans auf Grund der Straßenzulassung

Ausgangspunkt für die zunehmenden Probleme bei der Umstellung von Fahrzeugkranen ist die Stufe III A, weil bis zu dieser Stufe die Abgasemissionsgrenzwerte noch durch rein innermotorische Maßnahmen eingehalten werden konnten. Um sowohl die Grenzwerte der Stufe III B durch Reduzierung von NO_x- und PM-Emission im Vergleich zur Stufe III A zu erreichen, als auch eine weitere Reduzierung der NO_x-Emissionen bei der Stufe IV im Vergleich zur Stufe III B zu realisieren, wurden Abgasnachbehandlungssysteme (AGN) erforderlich. Weiterhin wurden ab der Stufe III B

tiefer greifende Maßnahmen in der Motorenkonstruktion, der Einspritz-, Verbrennungs- und Aufladetechnik vom Motorenhersteller vorgenommen.

Diese technischen Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung ab Stufe III B führten zu einer Zunahme an Komponenten, die wesentlich mehr Bauraum benötigen. Dieser Bauraum ist aber bei Fahrzeugkranen nicht beliebig erweiterbar. Beim AT-Kran ist der Einbauraum wegen der notwendigen Straßenzulassung beschränkt. Neben dem straßenzulässigen AT-Kran müssen auch die anderen Fahrzeugkrantypen diese Transportmaße einhalten, da diese zwar nicht selber fahren, aber ebenfalls auf öffentlichen Straßen in Transporteinheiten zum Einsatzort transportiert werden müssen.

Mit der steigenden Anzahl an Komponenten nimmt auch das Gesamtgewicht der Fahrzeugkrane zu. Dies führt vor allem beim AT-Kran zu aufwendigen Konstruktionsarbeiten auf Grund einer Überschreitung des zulässigen Gewichts von 12 t je Achse. Ist dies der Fall, muss das zusätzliche Gewicht anderweitig reduziert oder falls möglich, auf die restlichen Achsen verteilt werden.

2.3.2 Spezifische marktwirtschaftliche Probleme von Fahrzeugkranen in Verbindung mit Emissionsregulierungen

Fahrzeugkrane werden auch wegen ihres hohen Investitionsvolumens zwischen 300.000 und 15 Mio. € weltweit eingesetzt. In der Regel sind es Firmen, die die Krane kaufen und im weltweiten Einsatz vermieten. Mit strikteren Emissionsgrenzwerten werden aber die weltweite Zulassung und der Betrieb von Fahrzeugkranen erschwert. Auf Grund unterschiedlicher, weltweiter Gesetzgebung bezüglich Abgasemissionsgrenzwerten entstehen politische Marktbarrieren. In Abbildung 2-6 sind die geltenden Vorschriften zu Abgasemissionsgrenzwerten in unterschiedlichen Regionen für mobile Maschinen und Geräte dargestellt. Europa, die USA und Japan haben die schärfsten Grenzwerte. Der Rest der Welt schreibt weniger strikte Grenzwerte vor.

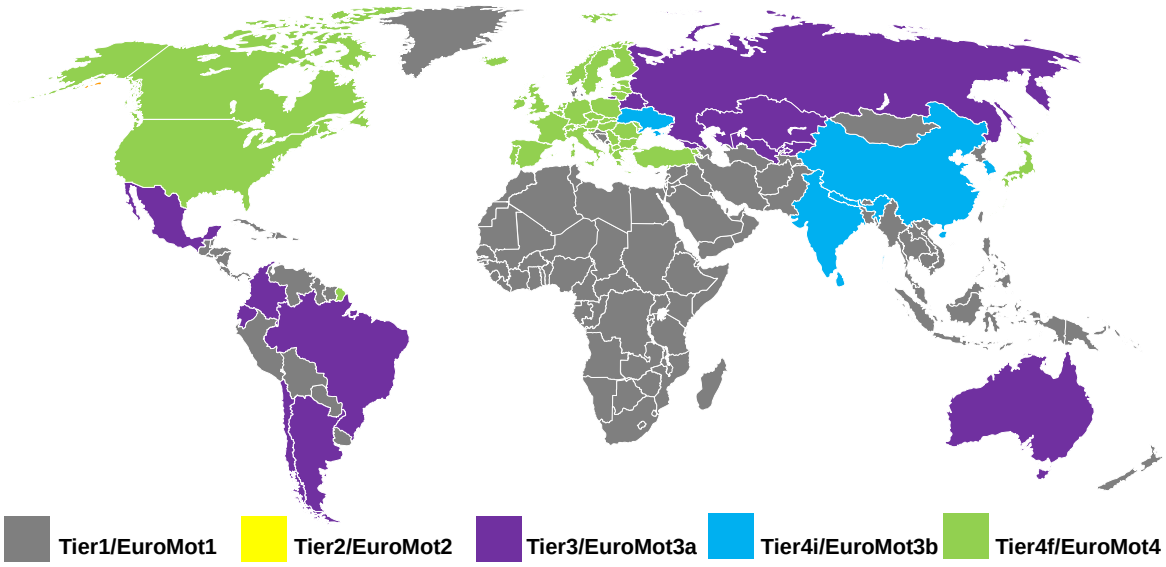

Abbildung 2-6: Weltweite Abgasemissionsregulierung 2014

Ein Resultat für global operierende Mietfirmen ist, dass diese Schwierigkeiten haben, ihren Kran wegen unterschiedlichen Abgasregulierungen weltweit einzusetzen. Mit der geplanten Stufe V für den europäischen Raum würden in Europa die strengsten Grenzwerte der Welt bestehen. Hinzu kommt, dass aktuell keine Bestrebungen zur Harmonisierung mit den USA bestehen. Darin liegt eine weitere Marktbarriere für den weltweiten Einsatz von Fahrzeugkranen und AT-Kranen. Die technologisch komplexe Abgasnachbehandlung mit dem SCR-System zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte ist sensibel gegenüber schwefelhaltigem Dieselkraftstoff. Ab 50 ppm Schwefelgehalt im Diesel kommt es zu Beeinträchtigungen im Abgasnachbehandlungssystem. Wie in Abbildung 2-7 zusehen, ist schwefelarmer Dieseltreibstoff allerdings größtenteils nur in bestimmten Teilen Europas, Nordamerika und Australien verfügbar. Hinzu kommt die mangelnde weltweite Infrastruktur zur Versorgung mit dem Harnstoff AdBlue®, welcher als Reduktionsmittel für die Abgasnachbehandlung notwendig ist. Diese technischen Barrieren erschweren neben diversen Regularien in unterschiedlichen Teilen der Erde den weltweiten Einsatz von Fahrzeugkranen und mindern durch die beschränkten Nutzungsmöglichkeiten den Wiederverkaufswert von Fahrzeugkranen.

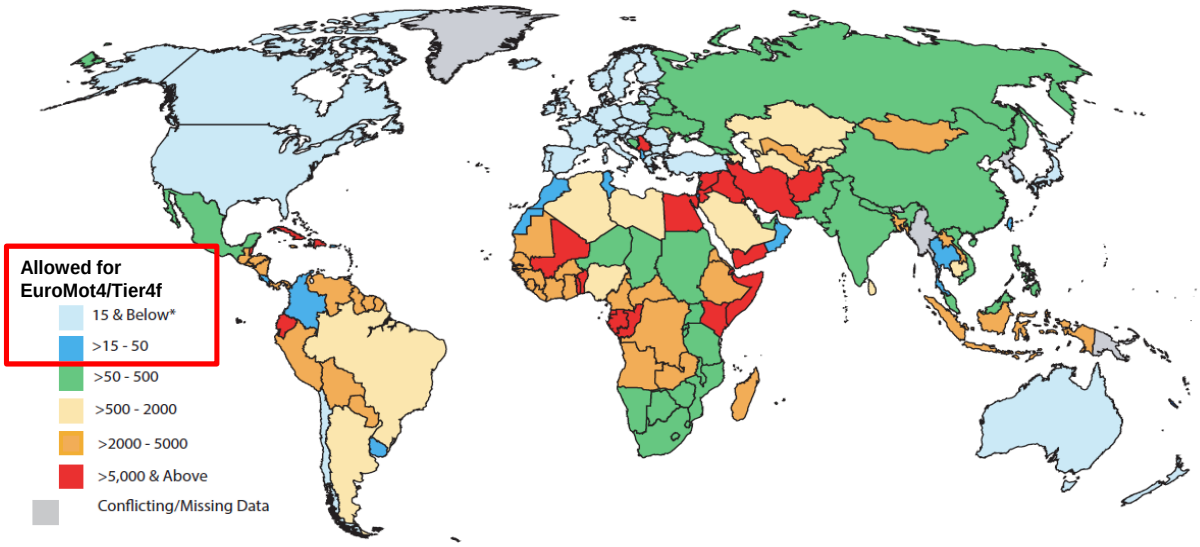

Abbildung 2-7: Globale Stufen für schwefelarmen Dieselkraftstoff 10/2013 [UNEP-2013]

Als Lösung der beschriebenen Probleme und um die Vermarktbarkeit von gebrauchten Kranen in nicht regulierten Märkten sicherzustellen, bieten die Hersteller zusätzlich III A Varianten an.

2.4 Exemplarische Betrachtung des All-Terrain Krans für weitere Analysen

Der AT-Kran ist im Vergleich zu den anderen Fahrzeugkrantypen der am meisten verkaufte Krantyp in Europa und bildet mit unterschiedlichen Modellvarianten 70 bis 90 Prozent der verkauften Stückzahlen der europäischen Hersteller ab. Auf Grund dieser Dominanz wird der AT-Kran als Referenz stellvertretend für alle Fahrzeugkrane im Rahmen der weiteren Untersuchungen verwendet. Im Wesentlichen gelten die dargestellten Restriktionen und Probleme auch für die anderen Fahrzeugkrane, weshalb der notwendige Aufwand für Änderungen direkt übertragbar ist.

2.4.1 Spezieller Aufbau von All-Terrain-Kranen

Abbildung 2-8 zeigt einen AT-Kran in Fahrstellung. Im konstruktiven Aufbau bestehen diese Krane aus einem Unterwagen, der den Fahrantrieb des Krans beinhaltet und einem Oberwagen, der den eigentlichen Kran darstellt. Die Verbindung zwischen Unter- und Oberwagen wird mithilfe eines Drehkranzes realisiert, der die Kräfte und Momente aus dem Oberwagen in den Unterwagen überträgt.

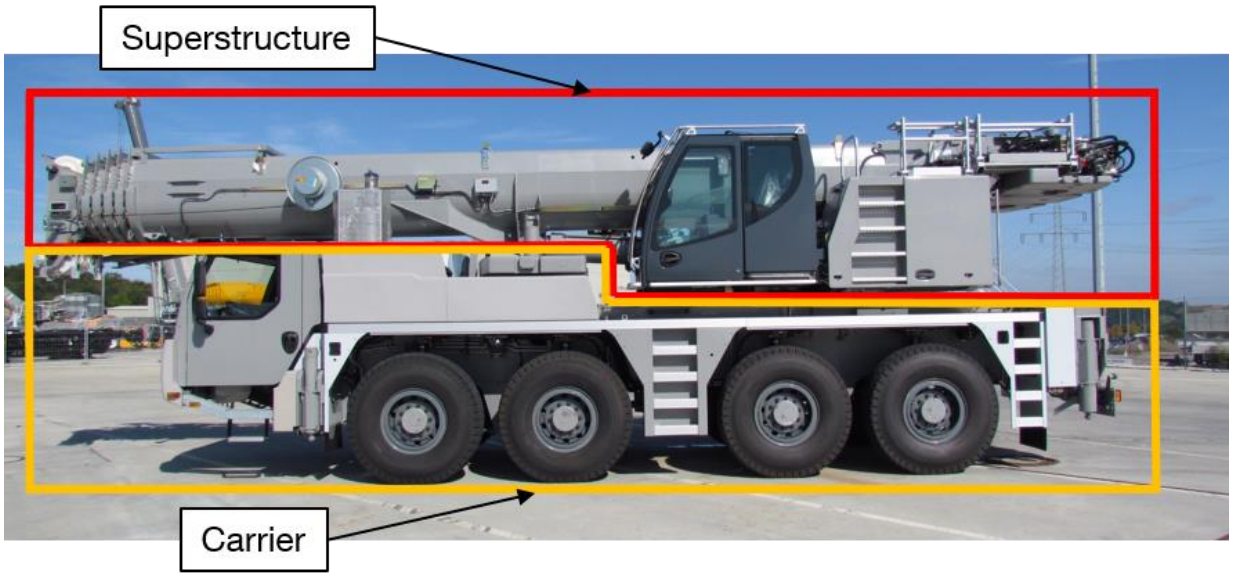

Abbildung 2-8: All-Terrain-Kran in Fahrstellung

In der Vergangenheit haben sich für AT-Krane zwei unterschiedliche Antriebskonzepte etabliert. Für kleinere Krane wird nur ein Dieselmotor für den Fahrantrieb und für den Antrieb der Kranfunktionen verwendet. Für größere Maschinen, ab einer Tragfähigkeit von ca. 80 t, wurde in der Vergangenheit immer ein zweiter, kleinerer Motor eingebaut. Dieser versorgt die Kranfunktionen mit der geforderten Leistung. Die Leistungsübertragung in den Oberwagen erfolgt beim Ein-Motor-Kran hydraulisch mit einer Drehdurchführung oder mit einer mechanischen Welle. Seit kurzem werden auch größere Maschinen nur noch mit einem Motor im Unterwagen entwickelt, da sich hieraus Einsparungen beim Platzbedarf im Oberwagen und der Eigenmasse des Krans ergeben und nur noch ein Abgasnachbehandlungssystem zur Reinigung der Abgase notwendig ist [o.V.-2014].

Abbildung 2-9 zeigt einen 4-achsigen AT-Kran in Arbeitsstellung mit dem für diese Größenklasse momentan weitverbreitetem Zwei-Motoren-Antriebskonzept. In der Arbeitsstellung steht der Kran nicht auf seinen Reifen, sondern ist mithilfe der Abstützungen auf dem Boden aufgeständert. Durch eine breite Abstützbasis wird ein sicherer Stand während der Kranarbeiten garantiert und die Eigenmasse des Krans dient zusätzlich zum Ballast als Gegengewicht, das dem Lastmoment entgegenwirkt.

Bei den meisten AT-Kranen handelt es sich um Teleskopauslegerkrane, bei denen der Ausleger mithilfe des Wippzylinders aufgerichtet wird. Der Teleskopausleger ist mithilfe von Spitzen, wie etwa der hier dargestellten Klappspitze verlängerbar, um die Reichweite bzw. die Hubhöhe und damit den Arbeitsbereich vergrößern zu können. Die beengten Platzverhältnisse im Bereich des Unterwagenmotors und auf dem Oberwagen ergeben sich aus den Beschränkungen für die Abmessungen für die Straßenfahrt.

Abbildung 2-9: Komponenten und Aufbau eines All-Terrain-Krans

2.4.2 Spezieller weltweiter Einsatzzweck von All-Terrain-Kranen

Fahrzeugkrane werden für vielfältige Hubaufgaben auf Baustellen, in der Chemie-Industrie oder bei Bergungsaufgaben eingesetzt. So vielfältig wie sich die von den Kranherstellern angebotenen Modelle und Rüstzustände für AT-Krane gestalten, so vielschichtig sind auch die Einsatzgebiete.

Eine erste Klassifizierung der Einsätze kann nach der Tragfähigkeit des Krans unternommen werden. Krane im Bereich einer Tragfähigkeit bis ca. 100 t werden häufig im sog. Taxi-Kran-Geschäfft sehr regional eingesetzt. Das bedeutet, dass der Kran mit einem Großteil seiner Ausrüstung von einem Einsatzort zum nächsten wechselt und dort nur sehr kurz im Einsatz ist. Die Einsatzdauern liegen typischerweise im Bereich weniger Stunden bis Tage, der Kran kann ohne weitere Hilfe eines anderen Krans – meist sogar von einer Person – gerüstet werden. In diesen Bereich fallen auch Krane, die bei der Feuerwehr oder generell bei Unfallbergungen eingesetzt werden.

Im nächsten Bereich lassen sich Krane mit einer Tragkraft von 100 t bis 300 t einordnen. Diese Krane werden im Bausektor bei größeren Bauwerken wie Brücken oder bei Industriemontagen eingesetzt. Die Einsatzdauern sind i.d.R. länger und der Kran kann nicht mehr mit seiner kompletten Ausrüstung verfahren werden. Da die Rüstmöglichkeiten in dieser Klasse bereits sehr komplex sind, müssen Ausrüstungen wie Gegengewichte oder Auslegerverlängerungen wie Gitterspitzen bereits separat mit Lkws zum Einsatzort transportiert werden. Der Einsatz dieser Krane ist überregional zu sehen, die typischen Einsatzdauern liegen im Bereich von Tagen oder Wochen.

Großgeräte mit einer maximalen Tragfähigkeit von über 300 t haben ihre Einsatzgebiete vor allem bei Schwerlasthüben, beim Aufbau von Chemieanlagen und in jüngerer Vergangenheit verstärkt beim Errichten von Windkraftanlagen (siehe Abbildung 2-10).

Abbildung 2-10: Hubaufgaben und Einsatzgebiete von All-Terrain Kranen

Bei diesen Kranen muss ein Großteil der benötigten Ausrüstung mit Lkws zum Einsatzort geliefert werden, da die Beschränkungen für die Straßenfahrt hinsichtlich Achslasten und Abmessungen keinen Verbleib dieser Zusatzausrüstungen am Grundgerät erlauben. Zum Rüsten des Krans ist in vielen Fällen ein weiterer, kleinerer Kran notwendig. Diese Krane sind weltweit im Einsatz, die Einsatzdauern können bis zu einem ganzen Jahr betragen.

3 Methodisches Vorgehen

3.1 Datenerhebung

Im Rahmen der Datenerhebung erfolgte zunächst die theoretische Vorarbeit. Diese beinhaltete die Sammlung, Sichtung und Auswertung von bestehenden Studien, Statistiken, Fachpublikationen sowie Gesetzestexten.

Eine Primärerhebung diente zur Generierung von notwendigen Eingangsdaten für die Berechnung des Abgasemissionsinventars, die Erstellung der Folgenbewertung sowie die Erarbeitung der Projektion zur Schätzung von Auswirkungen der geplanten Abgasstufe V auf die Fahrzeugkran-Branche. Diese Eingangsdaten wurden bei vier Kranherstellern und drei Motorenherstellern aufgenommen.

Dazu wurden zum einen in persönlichen Gesprächen bei vier Herstellern für Fahrzeugkrane aus der Europäischen Union mit Hilfe eines vorab erstellten und bereitgestellten Fragebogens Daten aufgenommen. Zusätzlich wurden der Forschungsstelle von allen Herstellern weitere Unterlagen wie technische Dokumentationen, Bildmaterial, Zeitpläne und Aufwandsschätzungen bereitgestellt. Diese Informationen wurden von der Forschungsstelle zusammengeführt und anonymisiert aufbereitet, damit keine Rückschlüsse auf einzelne Hersteller gezogen werden können. Die befragten vier Hersteller haben gemeinsam einen Marktanteil im AT-Kran Segment von 94 % in Europa. Dabei stellen AT-Krane 70 bis 90 Prozent der gesamten Verkaufszahlen von Fahrzeugkranen der Hersteller in Europa dar, so dass die Ergebnisse als repräsentativ für alle Fahrzeugkrane und die gesamte Branche angesehen werden können. Der verwendete Fragebogen für die Fahrzeugkranhersteller ist dem Anhang H zu entnehmen.

Zum anderen wurden für die Projektion weitere Daten bei Motorenherstellern aufgenommen, um anstehende Änderungen am Motor sowie Abgasnachbehandlungssystem und die dafür vorgesehene Zeitplanung in Erfahrung zu bringen. Diese Informationen dienten den Herstellern zur Prognose der notwendigen Anpassungen an ihren Maschinen. Mittels eines Fragebogens wurden bei drei Motorenherstellern die Daten erhoben. Dafür wurden mit den Kranherstellern zwei Motorenlieferanten besucht und in einem persönlichen Gespräch Informationen aufgenommen. Ein Motorhersteller füllte den Fragebogen eingeständig aus und schickte diesen an die Forschungsstelle zurück. Die befragten Motorenhersteller bilden 100 Prozent der Lieferanten, die Motoren zum Einbau in AT-Krane an die vier Hersteller liefern. Der verwendete Fragebogen für die Motorenhersteller ist dem Anhang G zu entnehmen.

3.2 Berechnungsmodell für Abgasemissionen von All-Terrain Kranen

Ein wesentliches Element der vorliegenden Studie ist die Untersuchung des Abgasemissionsverhaltens von Fahrzeugkranen. Dies dient zum einen dazu, den Anteil an NO_x- und PM-Emissionen, der auf den Betrieb von Kranen zurückzuführen ist, darzustellen und zum anderen die Auswirkungen der Einführung der Stufe V hinsichtlich unterschiedlicher Einführungsszenarien zu vergleichen. In der Vergangenheit haben sich für die Berechnungen zwei unterschiedliche Ansätze etablieren können. Neben dem auf Kraftstoffverbräuchen und korrespondierenden Emissionsfaktoren basierenden Top-Down-Ansatz, existiert als Alternative der sog. Bottom-Up-Ansatz, der die von der Maschine geleistete Arbeit zugrunde legt [Hel-2014a]. Ein bereits mehrfach zur Anwendung gekommenes Berechnungsmodell, das diesen Ansatz konsequent verfolgt, ist das allgemein anerkannte Modell TREMOD-MM, das vom ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg in [Hel-2004, Hel-2009] zur Berechnung von gasförmigen Schadstoffen und des Kraftstoffverbrauchs von mobilen Maschinen und Geräten entwickelt wurde. Auf Grund der guten Datenlage für dieses Modell und der Tatsache, dass sich Modelle nach dem Bottom-Up-Ansatz bereits in zahlreichen Untersuchungen bewährt haben [Hel-2014a, Hel-2014b, JRC-2008, EPA-1991], wird das Modell TREMOD-MM auch im Rahmen der vorliegenden Studie für das Abgasemissionsinventar verwendet und auf die kranspezifischen Besonderheiten angepasst. Eine ausführliche Darstellung des Berechnungsverfahrens und der im Rahmen der vorliegenden Studie verwendeten Daten kann Anhang D, Anhang G und Anhang H entnommen werden. Für die Berechnung der Emissionen des AT-Kran-Bestandes wird davon ausgegangen, dass die Populationsstruktur hinsichtlich Krangrößen im Wesentlichen der Struktur der in den Jahren 2011 bis 2013 verkauften Krane entspricht.

In diesem Modell wird auf Basis der eingesetzten Motorleistungen, eines Lastfaktors, der den Anteil der tatsächlich abgerufenen Leistung im Betrieb charakterisiert und der Anzahl der jährlich abgeleisteten Betriebsstunden der mittlere Energiebedarf abgeschätzt. Mithilfe von energiebedarfsbezogenen Emissionsfaktoren, die sich im Wesentlichen an der Abgasemissionsgesetzgebung orientieren, können neben dem Kraftstoffverbrauch auch die Schadstoffemissionen berechnet werden. In Abbildung 3-1 ist das Vorgehen für das Ableiten des Basisemissionsfaktors schematisch dargestellt.

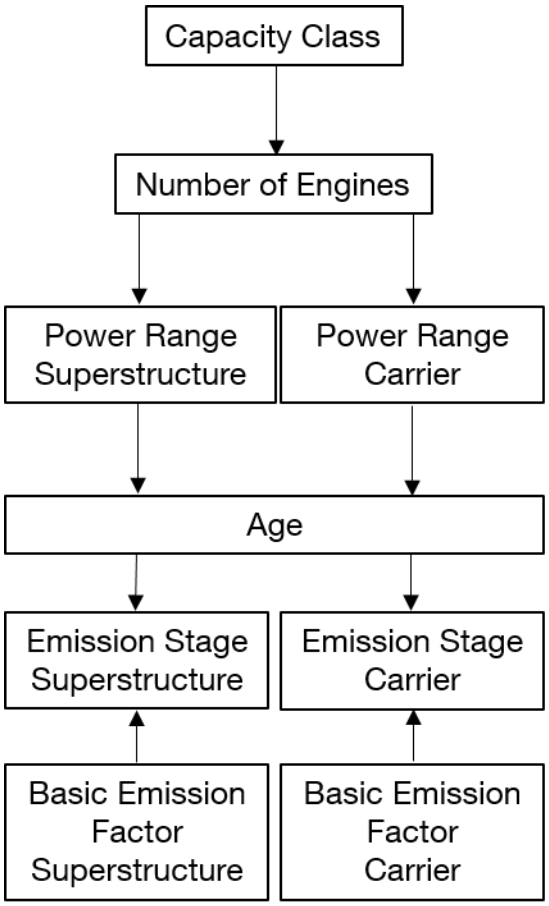

Abbildung 3-1: Vorgehen zum Ableiten der Basisemissionsfaktoren für AT-Krane

Ausgehend von einer Einteilung der AT-Kranverkäufe der Jahre 2011 bis 2013 hinsichtlich Tragfähigkeit und Anzahl der verbauten Motoren in insgesamt sieben Klassen, werden die Motorleistungsdaten für den Unter- und den Oberwagen jeder Klasse als Mittelwerte berechnet. Mit diesen Leistungsdaten und dem Alter der Maschine kann sowohl für den Unter- als auch für den Oberwagen die gültige Emissionsstufe abgeleitet werden. Jeder Emissionsstufe ist dann ein Basisemissionsfaktor für die Berechnung zugeordnet. Dieser Basisemissionsfaktor wird mit einem transienten Anpassungsfaktor, der berücksichtigt, dass die Maschine im Vergleich zum Prüfzyklus dynamisch genutzt wird und einem altersbedingten Verschlechterungsfaktor, der den Verschleiß der Maschine betrachtet, erweitert. Mit diesen Basisdaten können die Abgasemissionen für den Bestand in jedem Jahr berechnet werden. Zusätzlich sind Prognosen für das zukünftige Abgasemissionsverhalten unter veränderten Randbedingungen (Einführung neuer Stufen, Übergangszeiten, etc.) möglich. Die Güte der Berechnungsannahmen wird geprüft, indem zusätzlich der Kraftstoffverbrauch im Modell mit berechnet und mit Gesamtwerten aus [Sch-2013] abgeglichen wird.

3.3 Ansatz zur Folgenbewertung und Projektion

Vorgehen zur Folgenbewertung

Grundlage für die Folgenbewertung bilden die aufgenommen Daten und bereitgestellten Unterlagen der vier befragten Fahrzeugkranhersteller. Zuerst wurden die technischen Aspekte untersucht, indem die konstruktiven Änderungen zur Anpassung der AT-Krane an die neuen Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme betrachtet wurden.

Der für diese Änderungen notwendige Zeitraum, zur Umstellung aller Modelle je Hersteller für die Stufe III A auf III B und III B auf IV, wurde auf Grundlage von Terminplänen und Zeitangaben der Hersteller für die gesamte Branche abgeleitet. Die Berechnung der Auslastung erfolgte anhand der zur Verfügung stehenden Zeit der Belegschaft aus Konstruktion, Entwicklung und Versuch (ohne Produktion / Prototypenbau) in Tagen (à 7 Std.) mit 220 Arbeitstagen im Jahr und den tatsächlich erbrachten Stunden / Tagen im Jahr für die Umstellung(en) je Unternehmen. Die Auslastung für die gesamte Branche wurde aus diesen einzelnen Berechnungen für jedes Jahr abgeleitet, weil von einem Hersteller die notwendigen Daten (erbrachte Stunden / Tage für die Umstellung und zur Verfügung stehende Stunden / Tage) nicht vorlagen, sondern die Auslastung für die Jahre in Prozent angegeben worden ist.

Zur Darstellung der ökonomischen Auswirkungen wurde auf Grundlage der Angaben der Fahrzeugkranhersteller zuerst eine Kostenaufstellung je Unternehmen erstellt. Hierfür wurden die aufgewendeten Arbeitsstunden je Hersteller in der Konstruktion / Entwicklung und im Versuch mit dem jeweilige Kostensatz des Hersteller multipliziert oder auf Grundlage von Kostenangaben für die Umstellung einiger Modelle für alle umgestellten Modelle hochgerechnet. Hinzu kamen die von den Herstellern angegebenen Kosten je Umstellung für den Produktionshochlauf, Homologation und TÜV sowie für die Lagerhaltung von Motoren. Alle Kostenarten wurden zur Darstellung der monetären Aufwendungen der Fahrzeugkran-Branche für die Umstellungen von AT-Kranen von der Stufe III A auf III B und der Stufe III B auf IV jeweils addiert. Die Erarbeitung der Auswirkungen auf die Umwelt beruht auf einer Berechnung des Abgasemissionsinventars für AT-Krane.

Vorgehen zur Projektion

Die Projektion der Auswirkungen einer Umstellung von Fahrzeugkranen auf Stufe V wird mittels einer Prognose, auf Grundlage der Datenerhebung sowie den Erkenntnissen aus der Folgenbewertung, unter Verwendung der Szenariotechnik erstellt.

Anschließend werden in einer **Trend-Impact Analysis** für die generierten Szenarien die Auswirkungen auf die PM- und NO_x-Emissionen quantitativ auf Grundlage des erstellten Abgasemissionsinventars berechnet. Ausgehend vom Emissionstrendverlauf bis 2020 (Business as usual) werden die Szenarien, mit unterschiedlichen Übergangszeiträumen, als zukünftige Ereignisse berechnet, um die bewirkten Veränderungen des Trendverlaufs durch die Szenarien zu quantifizieren und die Vorteile für die Umwelt zu benennen. Das dafür verwendete Berechnungsmodell sowie die getroffenen Annahmen sind im Anhang E zu finden.

Im Rahmen einer **Cost-Effectiveness Analysis** werden abschließend analog dem Vorgehen der Europäischen Kommission im Impact Assessement [SWD(2014) 281] die monetarisierten Auswirkungen der Einführung von neuen Grenzwerten für die Fahrzeugkran-Branche anhand der erstellten Szenarien berechnet. Damit können die Vorteile für Gesellschaft und Gesundheit bewertet werden. Das Berechnungsvorgehen sowie die getroffenen Annahmen sind im Anhang F hinterlegt.

4 Abgasemissionsinventar

4.1 Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen

Seit Einführung der Abgasemissionsstufe III B können Stickoxide bei AT-Kranen nicht mehr nur durch innermotorische Maßnahmen reduziert werden, sondern es werden herstellerübergreifend SCR-Systeme zur Reduzierung des Stickoxidausstoßes verwendet. In diesem Abschnitt soll aufbauend auf dem in Kapitel 3.2 und Anhang D vorgestellten Berechnungsmodell die Entwicklung der Emissionen von Partikeln und Stickoxiden von AT-Kranen vorgestellt werden. Für die Umstellungen von Stufe III A auf III B und Stufe III B auf IV wird ähnlich dem realen Geschehen davon ausgegangen, dass die Umstellung nicht in einem Jahr zu bewerkstelligen war, sondern sich über einen Zeitraum von drei Jahren erstreckt hat, wobei in jedem Jahr ein Drittel der Modelle umgestellt werden konnte.

Entwicklung des Emissionsverhaltens von Stickoxiden

Abbildung 4-1 zeigt die projizierte Entwicklung der Stickoxidemissionen von AT-Kranen in der Europäischen Union von 2005 bis zum Jahr 2050.

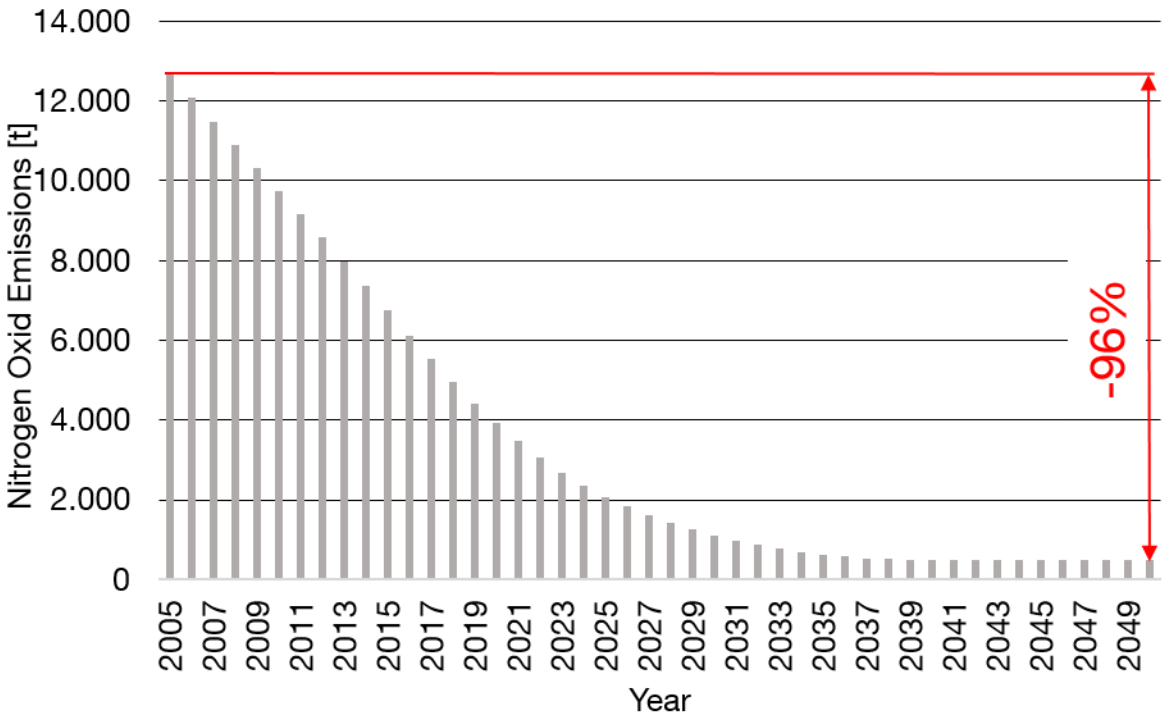

Abbildung 4-1: Entwicklung Stickoxidemissionen (Basis: Stufe IV) von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union

Durch die Einführung immer strikterer Emissionsgrenzwerte in der Ausgangsrichtlinie 97/68/EG sowie den Änderungsrichtlinien konnten die Stickoxidemissionen von AT-Kranen seit dem Basisjahr 2005 bis heute bereits erheblich reduziert werden. In Folge des Austausches älterer Geräte durch Maschinen mit den neuesten Abgasstufen wird sich dieser Trend bis zum Jahr 2041 weiter fortsetzen, so dass sich bis dahin ein Rückgang der Stickoxidemissionen um 96%, verglichen mit dem Jahr 2005 ergibt. Da für die geplante Stufe V nach [COM (2014) 581] keine weitere Verschärfung der Grenzwerte hinsichtlich Stickoxiden geplant ist, ergibt sich aus der Einführung dieser Stufe kein weiterer Rückgang von Stickoxiden.

Bestand und Vergleich zu Non-Road-Mobile-Machinery

Um die Emissionen hinsichtlich Stickoxiden, die beim Betrieb von AT-Kranen entstehen, besser einordnen zu können, werden diese Emissionen mit den Gesamtemissionen des Bereichs Non-Road-Mobile-Machinery (NRMM) verglichen. In Tabelle 4-1 sind die Vergleichszahlen und die Anteile, die von AT-Kranen an den Gesamtemissionen verursacht werden, für die Jahre 2005 und 2020 dargestellt.

Tabelle 4-1: Vergleich der Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen mit mobilen Maschinen

	Wert	Quelle
Stickoxidemissionen AT-Krane im Jahr 2005	12.700 t	Eigene Berechnung
Stickoxidemissionen NRMM 2005	1.716.000 t	[Kle-2012]
Anteil AT-Krane im Jahr 2005	0,74 %	-
Stickoxidemissionen AT-Krane im Jahr 2020	3.900 t	Eigene Berechnung
Stickoxidemissionen-NRMM 2020	1.017.000 t	[Kle-2012]
Anteil AT-Krane im Jahr 2020	0,38 %	-

Im Wesentlichen zeigt der Vergleich, dass AT-Krane für einen sehr geringen Anteil an den Stickoxidemissionen verantwortlich sind. Dies liegt zum einen daran, dass die Motoren in einem Leistungsbereich liegen, der seit der Einführung der Richtlinie 97/68/EG von der Gesetzgebung betroffen war und zum anderen dass die Population mit ca. 19.000 Maschinen in der Europäischen Union verhältnismäßig gering ist.

Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Stickoxidemissionen

Durch die Einführung der Abgasemissionsstufen seit dem Jahr 1999 tragen AT Krane einen unterschiedlich großen, altersabhängigen Anteil zu den Gesamtemissionen der Population innerhalb eines Jahres bei. In Abbildung 4-2 ist in dieser Hinsicht die

Aufteilung der Stickoxidemissionen für den Bestand des Jahres 2014 in Abhängigkeit der Baujahre abgebildet.

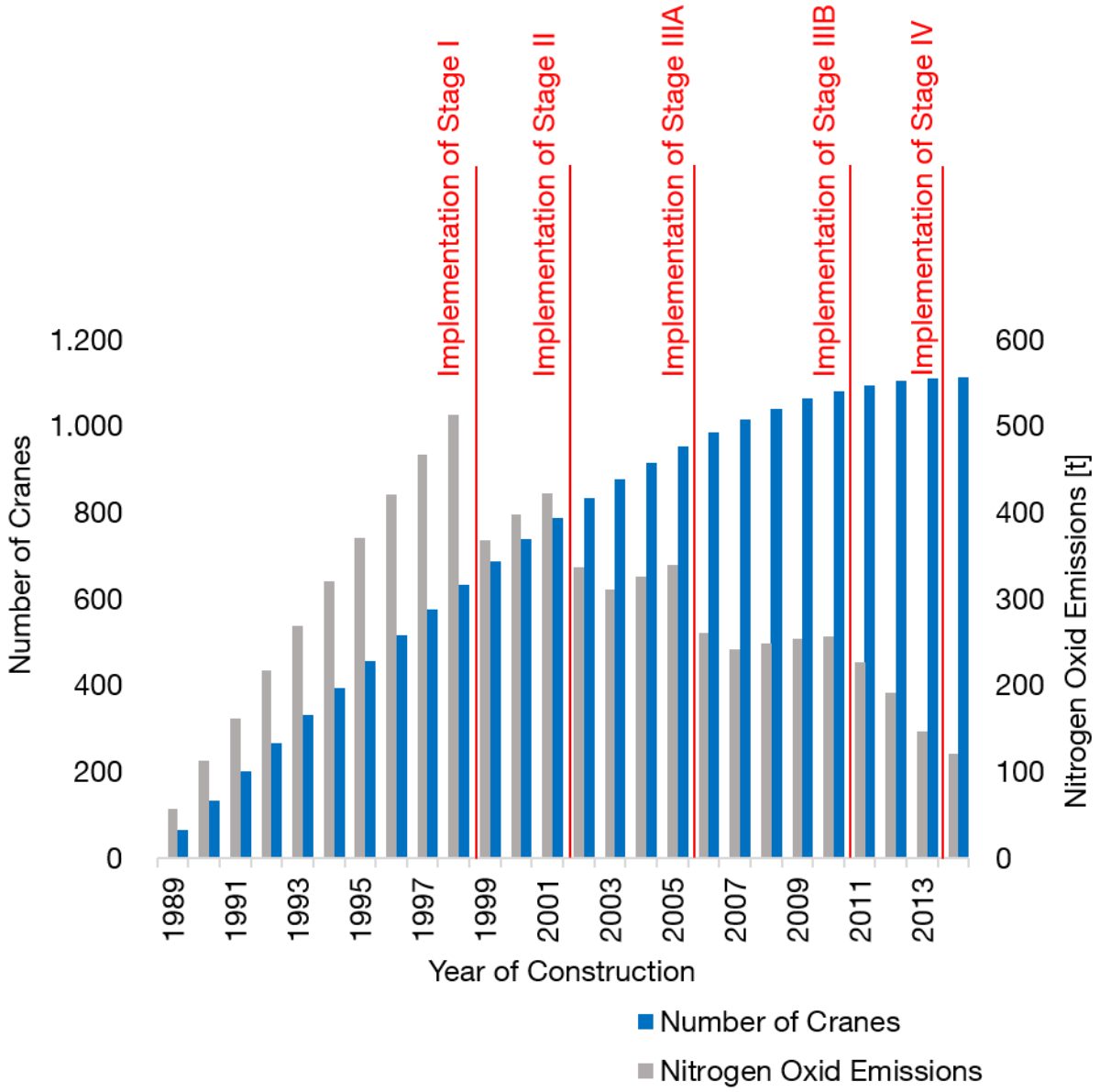

Abbildung 4-2: Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Stickoxidemissionen in der Europäischen Union von AT-Kranen für das Jahr 2014

Aus dieser Darstellung geht hervor, dass ein großer Anteil der Stickoxidemissionen auf den Betrieb von alten Maschinen bis zum Baujahr 1998 zurückzuführen ist, obwohl diese von der Anzahl her gesehen nur einen kleineren Teil der Population ausmachen. Im Gegensatz dazu ergeben sich durch die Einführung immer strikterer Grenzwerte, vor allem bei den Stufen III B und IV hinsichtlich der Stickoxidemissionen merklich geringere Werte für junge Krane, obwohl diese Krane nach der gewählten Altersstruktur einen höheren Anteil der Population besitzen.

4.2 Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen

Bei allen AT-Kranen werden die gesetzlichen Anforderungen an die zulässigen Partikelemissionen bis heute durch rein innermotorische Maßnahmen erreicht. Ein Abgasnachbehandlungssystem mit Dieselpartikelfilter ist bei diesen Maschinen bisher nicht notwendig und wird entsprechend von keinem Kranhersteller eingesetzt.

Entwicklung des Emissionsverhaltens von Partikelemissionen

In Abbildung 4-3 ist die Entwicklung der Partikelemissionen von AT-Kranen ausgehend vom Basisjahr 2005 bis zum Jahr 2050 dargestellt.

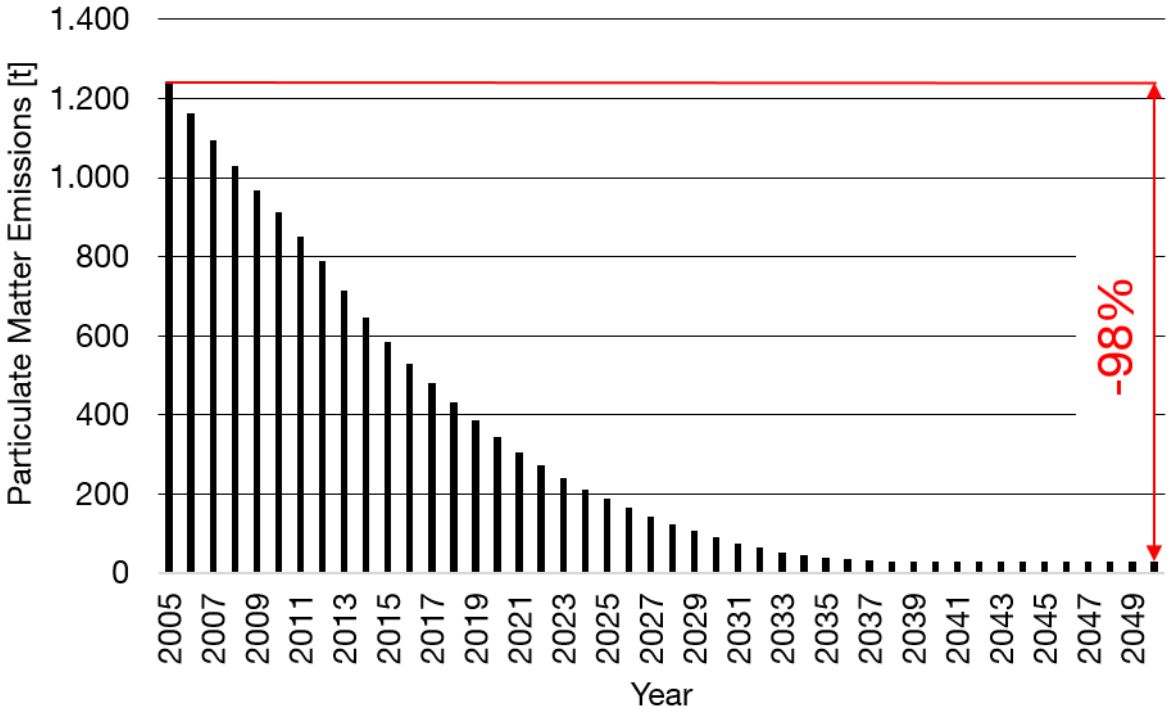

Abbildung 4-3: Entwicklung Partikelemissionen (Basis: Stufe IV) von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union

In dieser Abbildung ist ein signifikanter Rückgang der Partikelemissionen seit dem Jahr 2005 auf Grund der immer strikter werdenden Anforderungen an das Abgasemissionsverhalten von AT-Kranen zu erkennen. Bis zum Jahr 2014 konnte die emittierte Partikelmasse beinahe halbiert werden. Für die Projektion ab dem Jahr 2020 wird die Abgasemissionsstufe IV zugrunde gelegt. Die Einführung einer Stufe V, wie Sie im Moment zur Diskussion steht, würde zwar durch einen schärferen Grenzwert zu einer weiteren Absenkung gegenüber den dargestellten Werten führen, aber bereits durch die Einführung der bisherigen Stufen kann die Partikelmasse bis zum Jahr 2038 um 98% im Vergleich zum Basisjahr 2005 gesenkt werden.

Bestand und Vergleich zu Non-Road-Mobile-Machinery

Analog dem Vorgehen bei der Bewertung der Stickoxidemissionen, werden an dieser Stelle auch die Partikelemissionen von AT-Kranen für die Jahre 2005 und 2020 mit den Werten für NRMM verglichen. In Tabelle 4-2 sind die Werte für AT-Krane, welche mit dem in Anhang D beschriebenen Modell berechnet wurden, Werten für gesamt NRMM gegenübergestellt.

Tabelle 4-2: Vergleich der Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen mit mobilen Maschinen

	Wert	Quelle
Partikelemissionen AT-Krane im Jahr 2005	1.240 t	Eigene Berechnung
Partikelemissionen NRMM 2005	139.000 t	[Kle-2012]
Anteil AT-Krane im Jahr 2005	0,89 %	-
Partikelemissionen AT-Krane im Jahr 2020	345 t	Eigene Berechnung
Partikelemissionen NRMM 2020	60.200 t	[Kle-2012]
Anteil AT-Krane im Jahr 2020	0,57 %	-

Aus diesen Vergleichen geht hervor, dass AT-Krane sich in den betrachteten Jahren nur für einen geringen Anteil an den Emissionen verantwortlich zeichnen. Die Gründe hierfür ergeben sich analog aus denselben Randbedingungen, wie für die Stickoxidemissionen.

Vergleich zu anderen Emissionsquellen bei AT-Kranen

Neben den rein motorisch bedingten Partikelemissionen ergeben sich auch bei AT-Kranen weitere Emissionsquellen, die sich der Kategorie Feinstaub (particulate matter) zuordnen lassen, wie etwa Bremsen- und Reifenabrieb. In [Kle-2012] wird dieses Thema ebenfalls betrachtet und Werte für den erwarteten Beitrag dieser Emissionsquellen abgeschätzt. Da in diesem Bericht davon ausgegangen wird, dass die Masse dieser Emissionen in Zukunft auf einem ähnlichen Niveau liegen, wie die verbrennungsmotorisch bedingten Emissionen, soll innerhalb der vorliegenden Studie die aktuelle Situation bei AT-Kranen aufgezeigt werden. Abbildung 4-4 zeigt hierzu den Vergleich eines verschlissenen Kranreifens mit einem Neuen.

Abbildung 4-4: Vergleich eines abgefahrenen mit einem neuen Reifen für All-Terrain-Krane

Während der Laufzeit des Reifens wird die Profilmasse von im Mittel ca. 26 kg abgefahren, welche aus Vorher-Nachher-Messungen von Kranreifen ermittelt wurde. Der entstehende Abrieb kann zu einem bestimmten Teil als Feinstaub- bzw. Partikelemission angesehen werden. In dieser Hinsicht wird eine kurze Vergleichsrechnung zwischen den verbrennungsmotorisch verursachten Emissionen und den Emissionen aus dem Reifenabrieb dargestellt. Tabelle 4-3 zeigt die Berechnung der verbrennungsmotorisch bedingten Partikelemissionen je gefahrenem Kilometer für einen vier-achsigen AT-Kran.

Tabelle 4-3: Berechnung der verbrennungsmotorisch generierten Partikelemissionen je gefahrenem Kilometer

	Wert	Einheit
Motorleistung:	300	[kW]
Lastfaktor im Unterwagen:	0,25	[-]
Emissionsfaktor für Stufe IV:	0,025	[g/kWh]
Jährliche Betriebsstunden im Fahrbetrieb:	400	[h]
Jährlich zurückgelegte Strecke im Fahrbetrieb:	12.000	[km]
Partikelemissionen durch Motor im Fahrbetrieb:	0,0625	[g/km]

Die angegebenen, jährlichen 12.000 km im Fahrbetrieb entsprechen nach Herstellerangaben der Obergrenze an Fahrstrecke, die ein AT-Kran im Mittel in einem Jahr zurücklegt. Die weiteren Daten entsprechen den Basisdaten für das Abgasemissionsinventar für die Tragfähigkeitsklasse von 70 t bis 100 t. Aus diesen Daten ergibt sich ein mittlerer Ausstoß von Feinstaub von 0,0625 g je zurückgelegtem km. Dem-

gegenüber sind in Tabelle 4-4 die Basisdaten für die Berechnung der Feinstaubemissionen aus dem Reifenverschleiß dargestellt.

Tabelle 4-4: Berechnung der reifenverschleißbedingten Feinstaubemissionen je gefahrenem Kilometer eines AT-Krans

	Wert	Einheit
Profilmasse für den gesamten Kran:	208	[kg]
Reifenwechselinterwall:	30.000	[km]
Anteil Partikel / Feinstaub am Reifenverschleiß	0,01 bis 0,10	[-]
Reifenbedingte Emissionen je Kilometer:	0,0693 bis 0,693	[g/km]

Die gesamte Profilmasse des Krans wird auf Basis der vermessenen Alt- und Neureifen und der Anzahl der Reifen des Krans berechnet. Das Reifenwechselinterwall von 30.000 km entspricht den Erfahrungswerten der Kranhersteller. Für die Emission von Partikeln der Größen PM_{10} bzw. $PM_{2,5}$ kann nicht die gesamte Profilmasse angesetzt werden, sondern nur ein kleiner Teil. In [Kle-2012] wird dieser Anteil mit 1 Prozent für $PM_{2,5}$ und 10 Prozent für PM_{10} hinterlegt. Für weitere Angaben zu Basisdaten für Feinstaubemissionen wird auf [Qua-2008] verwiesen.

Damit wird die in [Kle-2012] getroffene Prognose, dass die Feinstaubemissionen aus Reifenabrieb, Bremsenverschleiß, etc. in der Zukunft die dominierenden Emissionsquellen sein werden, im Wesentlichen bestätigt. Legt man die $PM_{2,5}$-Emissionen zugrunde, weisen bei einem modernen AT-Kran mit der Emissionsstufe IV bereits heute die Feinstaubemissionen aus dem Reifenverschleiß die gleiche Größenordnung auf, wie die motorisch bedingten Emissionen. Damit erreichen neue Emissionsstufen in der Betrachtung der fahrzeugbedingten Gesamtemissionen nicht mehr die hohe Wirkung, wie es bei früheren Stufen der Fall war.

Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Partikelemissionen

Ähnlich dem Stickoxidausstoß wird auch beim Partikelausstoß der Anteil der einzelnen Baujahre an den Gesamtemissionen untersucht. Abbildung 4-4 zeigt die Partikelemissionen für das Jahr 2014, aufgegliedert nach den Baujahren der Bestandsmaschinen.

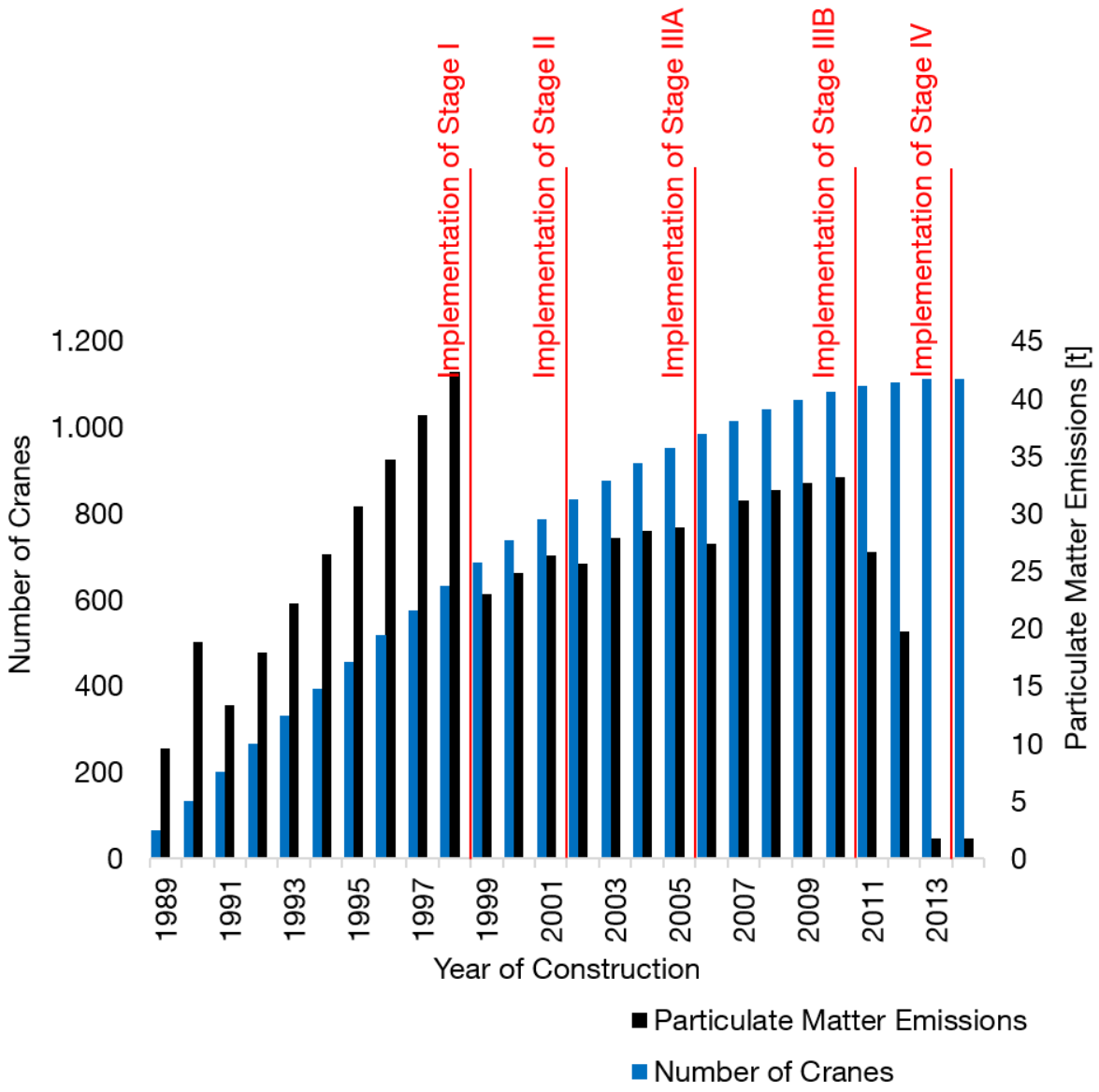

Abbildung 4-5: Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Partikelemissionen in der Europäischen Union von AT-Kranen für das Jahr 2014

Aus dieser Abbildung geht hervor, dass vor allem alte Krane, die vor Inkrafttreten der Richtlinie 97/68/EG bis zum Baujahr 1998 ausgeliefert wurden, einen hohen Beitrag an den Partikelemissionen haben, obwohl die Anzahl der Krane dieser Jahrgänge geringer ist, als bei den in den Jahren 2013 oder 2014 ausgelieferten Maschinen. Dieses Verhalten ist im Wesentlichen der immer strenger werdenden Gesetzgebung hinsichtlich Partikelemissionen zu verdanken. Vor allem ab der Stufe III B ist ein signifikanter Rückgang zu beobachten. Durch das hohe mittlere Alter von 13 Jahren bei den AT-Kranen in Europa dauert die Durchdringung des Bestandes mit Maschinen der neuesten Emissionsstufe relativ lange, so dass die alten Geräte mit hohen Emissionen erst nach und nach aus der Europäischen Union verdrängt werden.

5 Folgenbewertung der Umstellungen Stufe III A auf III B und III B auf IV

5.1 Technische Aspekte der Umstellungen

Mit der Einführung der Abgasstufe III B wurde die Bauform des Motors beibehalten. Jedoch änderte sich die Abgasnachbehandlung, von zuvor rein innermotorischen Lösungen, hin zur außermotorischen Nachbehandlung. Dazu wird in AT-Kranen bisher ausschließlich die Selektive katalytische Reduktion (SCR) eingesetzt, bei der ein SCR-Katalysator verwendet wird. Zum Betrieb des SCR-Katalysators wird als Reduktionsmittel Harnstoff verwendet, das in wässriger Lösung (AdBlue) in den Abgastrakt eingespritzt wird. Zum Einhalten der Grenzwerte für Stickoxide der Stufe IV wurde die SCR-Technik weiter entwickelt und ein neuer Grundmotor (neuer Motorblock, s. Anhang C) eingeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Änderungen am Motor und Abgasnachbehandlungssystem ist im Anhang C.1 zu finden. Hinzu kommt, dass ab der Stufe III B nicht nur der Motor zertifiziert wird, sondern das gesamte Motorsystem, bestehend aus Motor und Abgasnachbehandlung. Dieses Zertifikat erlischt bei jeglichen Änderungen am System, weil der Motorenhersteller die Funktionsfähigkeit und somit die Einhaltung der geforderten Grenzwerte nicht mehr garantieren kann. Somit müssen auch strikte Einbauvorschriften der Motorenhersteller für das gesamte Motorsystem eingehalten werden.

Mit den strikteren Grenzwerten kommen immer mehr Komponenten zur Abgasnachbehandlung und zum Motor hinzu. Diese Komponenten beanspruchen immer mehr Bauraum. Dieser Bauraum ist bei AT-Kranen aber wegen der Straßenzulassung auf 3 m Breite und 4 m Höhe beschränkt und somit nicht beliebig erweiterbar. Durch die zusätzliche Masse aus den Komponenten der Abgasnachbehandlung wird bei vielen Modellen das zulässige Gesamtgewicht oder die zulässige Achslast von 12 t überschritten. Das Gesamtgewicht muss dann anderweitig reduziert oder falls möglich, auf die restlichen Achsen verteilt werden, damit der AT-Kran weiterhin zum Fahren auf öffentlichen Straßen zugelassen werden kann. Wegen der genannten Restriktionen standen die Kranhersteller vor der großen Herausforderung, ihre große Anzahl an unterschiedlichen Kranmodellen auf die neuen Abgasstufen umzustellen.

Um die zusätzlichen Komponenten im beschränkten Bauraum unterzubringen, mussten verschiedene Baugruppen im Ober- als auch im Unterwagen geändert und / oder neu positioniert werden (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2). Dabei war der Lösungsraum für den Einbau und die Anordnung der Komponenten stark eingeschränkt. Um die Wirkung der Abgasnachbehandlung zu erreichen und folglich

die Emissionsgrenzwerte einzuhalten, muss der Einbau strikt nach den Angaben der Motorenhersteller erfolgen.

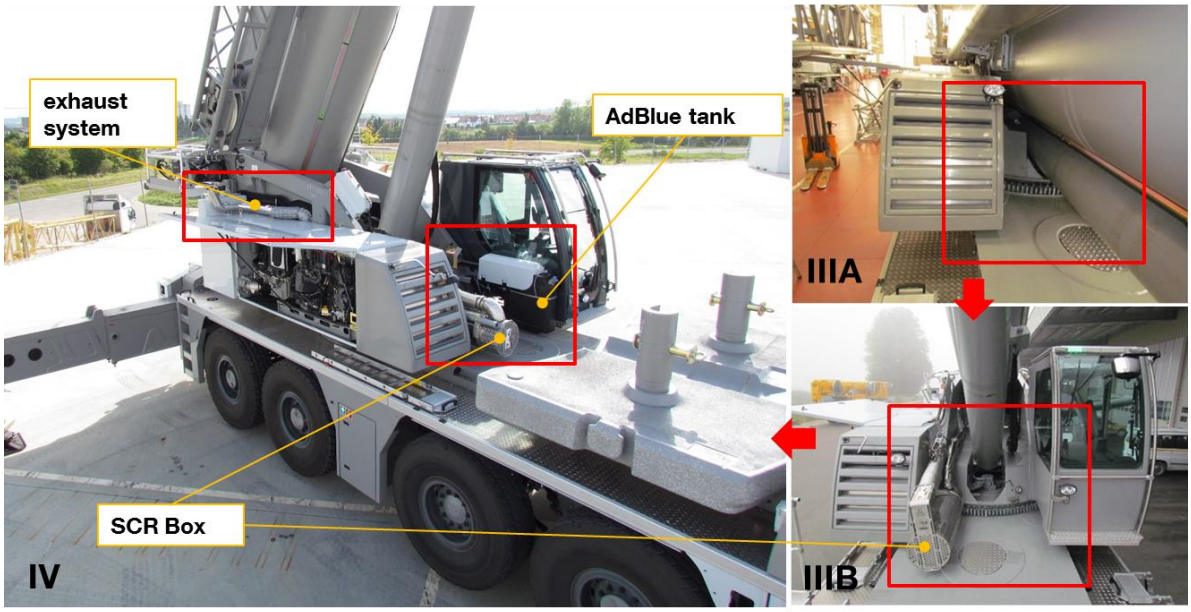

Abbildung 5-1: Änderungen am Oberwagen auf Grund von Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung, ausgehend von der Stufe III A auf III B und von III B auf IV

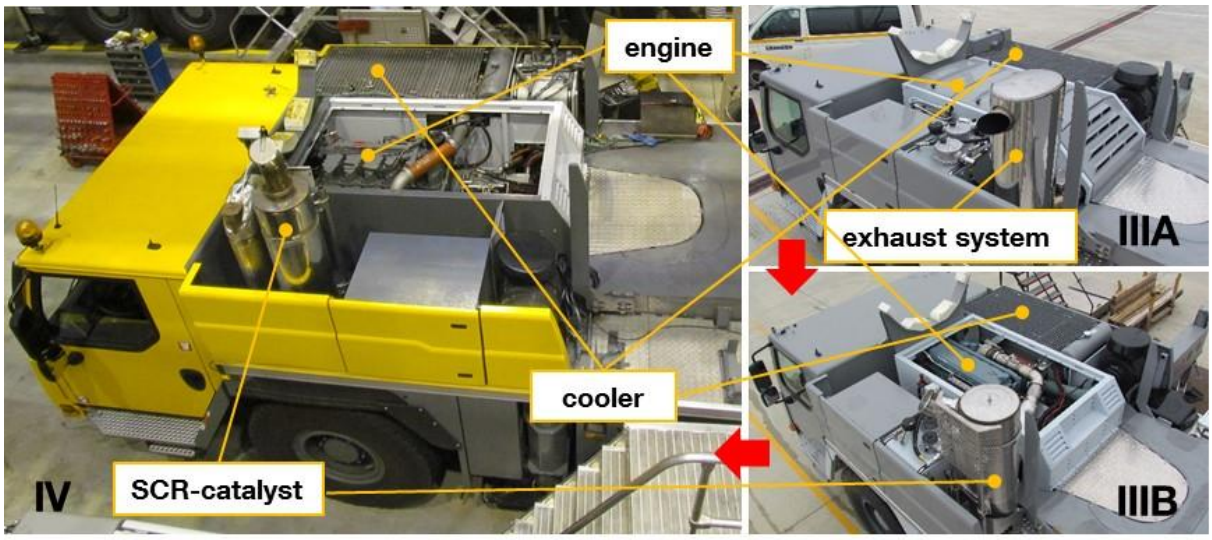

Abbildung 5-2: Änderungen am Unterwagen auf Grund von Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung, ausgehend von der Stufe III A auf III B und von III B auf IV

Mit den Änderungen am Motor musste die gesamte Peripherie neu gestaltet werden, wodurch weitere Bauteile von Anpassungen betroffen waren. Insbesondere die Volumenzunahme und die neue Bauform der Stufe IV Motoren führten zu umfangreichen Änderungen am Unterwagenrahmen, da der Motor mit dem Rahmen kollidierte. Im Nachhinein musste die Funktion des Rahmens als Tragwerk mittels FEM-Berechnungen erneut abgesichert werden.

Vor allem die Gewichtszunahme führte zu Änderungen weiterer Bauteile, um das zusätzliche Gewicht zu kompensieren oder anders zu verteilen. So mussten teilweise leistungsbeeinträchtigende Anpassungen am Gegengewicht durchgeführt werden, um die Straßenzulassung zu ermöglichen. Ausführliche Beschreibungen zu den Auswirkungen der Motoränderungen auf den AT-Kran sind am Beispiel des Ober- und Unterwagens im Anhang C beschrieben.

Im Durchschnitt waren ca. 30 Prozent der Baugruppen im Oberwagen und 40 Prozent der Baugruppen im Unterwagen von Änderungen durch neue Abgasstufen betroffen. Das heißt, dass mit jeder neuen Abgasstufe ein Drittel des gesamten Krans zum Einhalten der geforderten Emissionsgrenzwerte, geändert werden musste.

Hinzu kommt, dass bei einigen Kranmodellen schon mit dem Stufe IV Motor und Abgasnachbehandlungssystem keine Möglichkeit mehr bestand, das zulässige Gesamtgewicht einzuhalten. Um diese Kranmodelle weiterhin verkaufen zu dürfen, wurde zur Gewichtsreduzierung für den Antrieb im Oberwagen kein separater Dieselmotor mehr eingebaut. Für dieses Einmotorenkonzept bestand für diese Kranmodelle bisher keine vergleichbare Technologie am Markt, so dass aufwendige und zeitintensive Entwicklungsarbeit notwendig wurde, was eine komplette Neukonstruktion des Fahrwerkrahmens nach sich zog.

Jede Änderungsmaßnahme am AT-Kran führt zu vorgegebenen Versuchsreihen, die die Funktionalität und Sicherheit der Maschine sicherstellen sollen. Die Versuche und Abnahmen sind weiterhin erforderlich, um die Einhaltung aller geltenden Rechtsvorschriften (z. B. Maschinenrichtlinie 2006/42/EG) sowie die Homologation abzusichern.

5.2 Zeitliche Aspekte der Umstellungen

Die aufgezeigten Änderungen müssen an der gesamten Vielzahl von unterschiedlichen AT-Kranmodellen vorgenommen werden. Dabei müssen immer spezielle Lösungen, passend zum jeweiligen Kranmodell entwickelt werden. Hinzu kommt, dass sich mit unterschiedlichen im AT-Kran verbauten Leistungsklassen die Motoren ebenfalls signifikant unterscheiden. Deswegen kann eine gefundene Lösung zur Integration des Abgasnachbehandlungssystems und des geänderten Motors nicht auf alle Kranmodelle übertragen werden.

Diese umfangreichen Änderungen für die Umstellung der AT-Krane auf eine neue Abgasemissionsstufe nehmen einen bestimmten Zeitraum in Anspruch. Hinzu kommt, dass nicht alle Kranmodelle, die die Hersteller anbieten, gleichzeitig umgestellt werden können. Auf Grund vielfältig begrenzter Ressourcen, wie Personal und

Versuchsflächen, können die Hersteller ihr gesamtes Portfolio an Kranen nur hintereinander, mit zeitlichem Versatz, umstellen. In Abbildung 5-3 sind die zeitlichen Phasen der Umstellungen von AT-Kranen von Stufe III A auf III B und Stufe III B auf IV für die gesamte Fahrzeugkran-Branche auf Grundlage der bei den Herstellern erhobenen Daten dargestellt.

Wegen der früheren Einführungstermine der Stufe III B und der Stufe IV für Motoren innerhalb der Leistungsklasse 130-560 kW, im Vergleich zu den kleineren Leistungsklassen, wird für die Darstellung der zeitlichen Auswirkungen der Umstellungen von AT-Kranen diese Leistungsklasse als Referenz genommen. Weiterhin sind im Unterwagen der AT-Krane, wegen der notwendigen Leistung für den Fahrantrieb, immer Motoren mit mehr als 130 kW Leistung verbaut. Auch im Oberwagen werden überwiegend Motoren mit mehr als 130 kW eingesetzt, so dass der Einführungszeitraum für Motoren mit einer Leistung zwischen 130-560 kW maßgebend für die zeitliche Umstellung von AT-Kranen ist.

In der Zeitleiste ist die jeweils aktuell geltende Emissionsstufe für die Jahre farblich markiert (Start Stufe III B 01.01.2011 für 130–560 kW und Start Stufe IV 01.01.2014 für 130–560 kW). Mit der Umstellung auf Stufe III B haben die Hersteller Mitte 2008 mit ca. fünf Kranmodellen begonnen. Die weiteren Umstellungen der Kranmodelle auf Stufe III B werden mit einem zeitlichen Versatz von drei bis vier Monaten gestartet. Die letzten AT-Krane sind innerhalb der Branche Ende 2012 auf Stufe III B umgestellt worden. Ausgehend von 56 Modellen, die die Kranhersteller in Summe bei Stufe III A auf dem Markt angeboten haben, wurden im Zeitraum von 4,5 Jahren 42 Modelle auf Stufe III B umgestellt. Die verbleibenden Modelle wurden aus technischen oder kostenseitigen Gründen von den Herstellern entweder zurückgestellt oder auslaufen gelassen. Als Ende der Umstellung ist hier die konstruktive Fertigstellung inkl. Versuch und Produktionshochlauf dargestellt, also der Start der Serienproduktion und somit auch die Verfügbarkeit der Modelle auf dem Markt. Mit Abschluss der Umstellung der AT-Krane auf Stufe III B standen auf dem Markt zusätzlich sechs neu entwickelte Modelle mit der Stufe III B zur Verfügung.

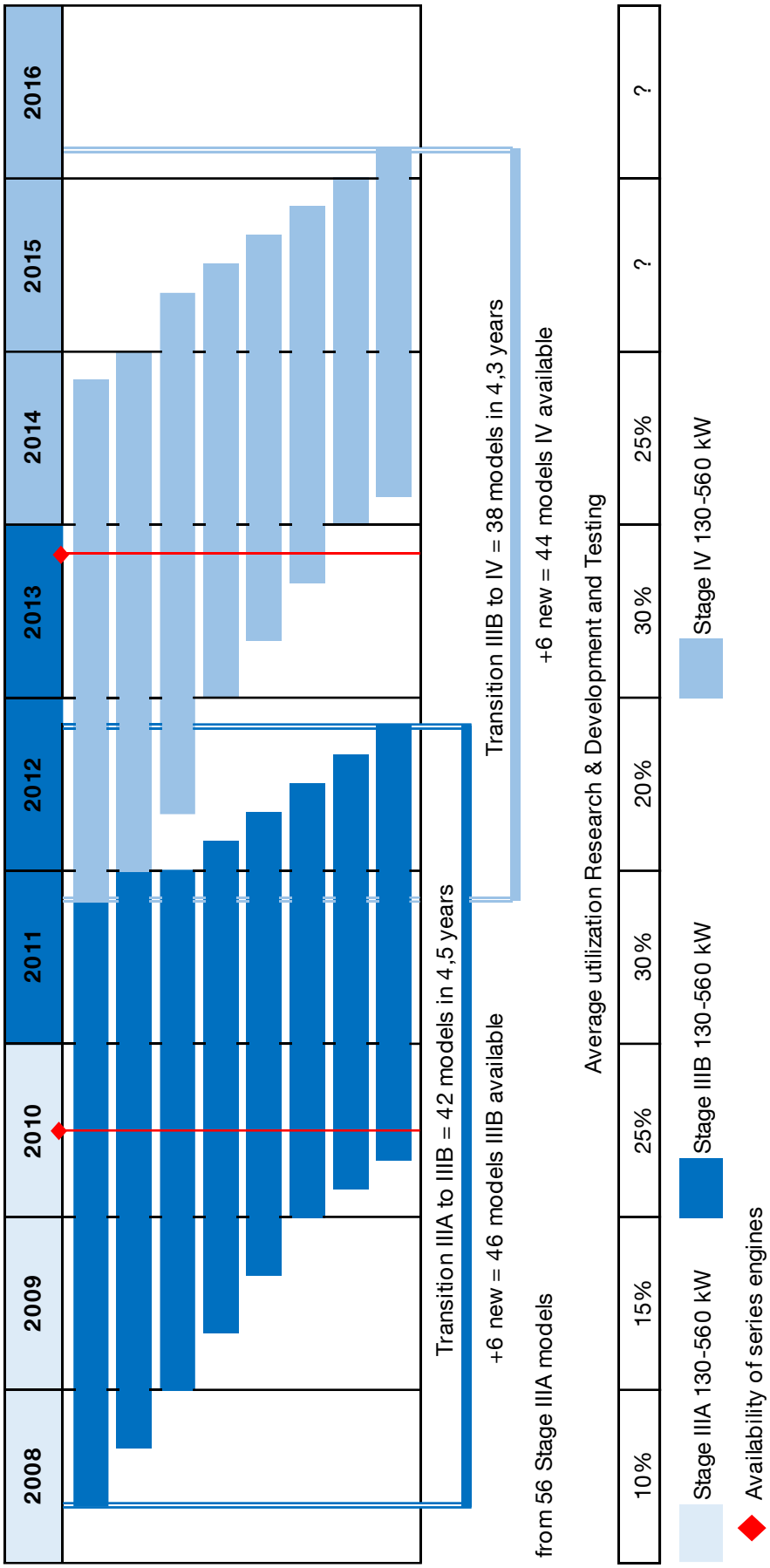

Abbildung 5-3: Zeitlicher Verlauf der Umstellungsphasen von AT-Kranen

Mit zeitlicher Überlappung haben die Hersteller mit der Umstellung auf Stufe IV Ende 2011 / Anfang 2012 begonnen. Ausgehend von den 42 AT-Kranmodellen der Stufe III B werden ebenfalls aus technischen nicht möglichen und / oder aus Kostengründen nur 38 Modelle auf Stufe IV umgestellt. Nach Angaben der Hersteller werden die letzten Modelle Anfang 2016 fertiggestellt. Somit brauchen die Hersteller in Summe 4,3 Jahre, um Ihr gesamtes Produktportfolio auf die Emissionsstufe IV umzustellen. Hinzu kommen wieder sechs neue AT-Kranmodelle, die mit der Emissionsstufe IV entwickelt wurden. Insgesamt haben die Hersteller zu Beginn der Umstellungen für Ihre Modelle mehr Zeit für die konstruktiven Anpassungen beansprucht. Im Schnitt benötigen sie je Modell mehr als zwei Jahre für die Umstellung.

Mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen ist es den Herstellern somit im Durchschnitt möglich, ca. 40 Kranmodelle in 4,5 Jahren umzustellen. Dabei konnte eine reibungslose Umstellung ohne signifikante Umsatzeinbußen wegen nicht umgestellter und verkaufter Krane nur mit den Übergangsregelungen (vgl. Kapitel 2.3) erreicht werden. Wie in Abbildung 5-3 für die Umstellung auf Stufe III B zu sehen, ist mit Start der Stufe III B im Jahr 2011 nur ein Drittel der Kranmodelle zum Ende von 2011 angepasst worden. Ohne Flexibilitätssystem und Übergangsmotoren hätten die Hersteller nach eigenen Angaben im Jahr 2011 zwei Drittel und im Jahr 2012 ein Drittel ihrer Produkte nicht in der EU verkaufen dürfen, weil diese noch nicht auf die geltende Emissionsstufe umgestellt worden sind.

Maßgebend für die Umstellungsdauer und somit die Fertigstellung der Umstellungsphase von AT-Kranen ist der Zeitpunkt, ab wann Serienmotoren, an denen keine Änderungen mehr vorgenommen werden müssen, für die Hersteller zur Verfügung stehen. Diese Zeitpunkte sind in Abbildung 5-3 als Meilensteine für Stufe III B Motoren und Stufe IV Motoren zu sehen. Nach Angaben der Fahrzeugkranhersteller war die Motorenverfügbarkeit generell zu spät. Basierend auf den Erfahrungen für Stufe III B und Stufe IV sind fertige Motoren ca. 12 bis 6 Monate vor dem Auslauf der alten Stufe verfügbar. Nach diesem Meilenstein benötigen die Hersteller je Umstellungsphase mehr als zwei Jahre, um alle ihre Modelle an den neuen Motor und das Abgasnachbehandlungssystem anzupassen.

Weil auch die Motorenhersteller eine gewisse Zeit brauchen, um Motoren und Abgasnachbehandlungstechnologien zu entwickeln und anzupassen, kam es in der Vergangenheit zu Verzögerungen bei der Umstellung von AT-Kranen auf Grund technisch unreifer (Vorserien-) Motoren (Hard- und Software) um ca. 25 Prozent. Dabei sind die Kranhersteller für ihre Umstellungen zeitlich von der Fertigstellung der Motoren abhängig, weil die Maschinen an den Motor neu angepasst werden müssen. Ändert sich wegen technischer Probleme die Bauform, die Lage von bestimm-

ten Anschlüssen am Motor oder das Abgasnachbehandlungssystem, müssen die Kranhersteller ihre Geräte wieder entsprechend den Änderungen anpassen.

Für die Umstellungsphasen von Stufe III A auf III B und Stufe III B auf IV entstand ein großer Arbeitsaufwand, insbesondere in der Abteilung Konstruktion und Entwicklung sowie im Versuch. Obwohl sich auch weiterer Arbeitsaufwand ergab, z. B. in der Produktion durch Mitarbeiterschulungen oder im Einkauf und der Logistik wegen neuer zu beschaffender und administrativ zu steuernder Bauteile, stellten die Kernressourcen Konstruktion / Entwicklung und Versuch einen Engpass dar. Die Auslastung der Arbeitskapazität dieser Kernressourcen für die Umstellung von AT-Kranen ist auf Jahresbasis für alle vier Fahrzeugkranhersteller in der Abbildung 5-3 dargestellt. Zu der angegebenen Auslastung kommen noch extern vergebene Aufträge an Ingenieurbüros für die Umstellung, da ohne diese externe Unterstützung die Umstellung aller AT-Krane in diesem Zeitraum nicht möglich gewesen wäre. Allerdings kann nur ein bestimmter Teil der Aufgaben extern vergeben werden. Spezielle Entwicklungsarbeiten können z. T. nur von eigenen Mitarbeitern getätigt werden. Von diesen sog. Schlüsselabteilungen ist in der Regel das weitere Vorgehen bei der Umstellung abhängig. So waren bestimmte Fachbereiche der Abteilungen bei den Unternehmen während der Umstellungsphasen teilweise mit bis zu 80 Prozent nur mit den Umstellungen ausgelastet.

Zu der angegebenen Auslastung in der Abteilung Entwicklung / Konstruktion und im Versuch kommt bei den Herstellern noch die Beanspruchung der Arbeitskapazität durch die Umstellung von weiteren Fahrzeugkrantypen über die AT-Krane hinaus hinzu. So ist in Summe die Auslastung der Kernabteilungen durch die Umstellung aller Fahrzeugkrantypen weit höher.

5.3 Ökonomische Auswirkungen der Umstellungen

Durch den erbrachten Arbeitsaufwand in der Abteilung Konstruktion / Entwicklung und im Versuch für die Umstellungen von AT-Kranen von der Stufe III A auf III B und III B auf IV ergeben sich für die Hersteller monetäre Aufwände, die in Abbildung 5-4 aufgelistet sind. Neben den Kosten für die Entwicklung fallen je Hersteller weitere Kosten für Homologation / Zulassung, Kosten für Qualitätsprobleme, die in Verbindung mit dem neuen Motorsystem stehen sowie Lagerkosten für Übergangsmotoren an. Für die Kostenaufstellung wurden nur Kosten berechnet, die unmittelbar mit der Umstellung von AT-Kranen auf eine neue Emissionsstufe entstehen. Das Vorgehen zur Kostenermittlung auf Grundlage der Herstellerangaben ist in Kapitel 3.3 beschrieben.

In Summe haben sich Kosten für die Fahrzeugkran-Branche für die Umstellung von AT-Kranen von der Emissionsstufe III A auf III B i. H. v. 31,80 Mio. € ergeben. Die Umstellung von der Emissionsstufe III B auf IV werden sich mit den Schätzungen der Hersteller bis zum Ende der Umstellungsphase auf 50,83 Mio. € belaufen. Hinzu kommen übergreifend für beide Umstellungen zusammen die Kosten für die Lagerhaltung und Kapitalbindung für Motoren mit ca. 4,53 Mio. € sowie die Kosten zur Behebung von Qualitätsproblemen, wie der Austausch von Vorserienmotoren oder die Nachrüstung von beheizbaren Harnstoff-Leitungen, i. H. v. 7,38 Mio. €.

	Stage IIIA to IIIB	Stage IIIB to IV
Research & Development and Testing incl. External contractors **Production ramp-up** **Homologation**	**31,80 m€**	**50,83 m€**
Inventory costs	**4,53 m€**	
Quality issues related to the engine	**7,38 m€**	
	37,76 m€	**56,79 m€**

Abbildung 5-4: Ökonomische Auswirkungen für Fahrzeugkran-Branche auf Grund Umstellungen des AT-Krans auf neue Abgasstufe

Weitere Aufwände und damit einhergehende Kosten für die Einführung neuer Emissionsstufen bei Fahrzeugkranen wurden nicht betrachtet. Dabei ist z. B. der administrative Aufwand im Einkauf, in der Logistik und der Produktionssteuerung ab der Einführung der Stufe III B wesentlich gestiegen. Ausschlaggebend ist die höhere Anzahl an Motorvarianten für unterschiedliche Märkte auf Grund unterschiedlicher Vorschriften für die zulässigen Emissionen. Abbildung 5-5 verdeutlicht die gestiegene Komplexität bei der Steuerung und Lagerung von mehreren unterschiedlichen Motoren ab dem Jahr 2010 im Vergleich zum vorhergehenden global einsetzbarem Motor der Stufe III A.

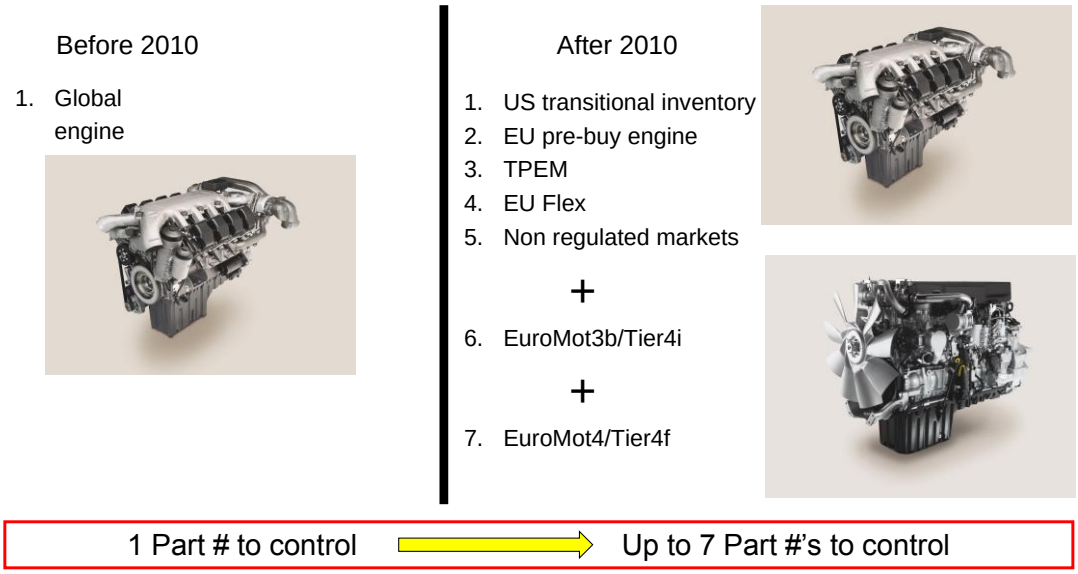

Abbildung 5-5: Vom globalen Motor zur komplexen Steuerung und Lagerung von unterschiedlichen Motoren ab 2010

Grund für diese gestiegene Anzahl an vorzuhaltenden Motorvarianten sind die Anforderungen der Märkte. Die europäischen Kranhersteller müssen modifizierte Motoren und Maschinen für Märkte anbieten können, wo unterschiedliche Regularien bzgl. Emissionsgesetzgebungen und technische Barrieren bestehen (vgl. Kapitel 2.3.2.), um diese Märkte und Umsätze nicht zu verlieren. Dies führt aus ökonomischer Sicht zu reduzierten Skaleneffekten und steigenden Kosten für die Maschinenherstellersteller [SWD (2014) 281].

Diese Wettbewerbsnachteile der kostenintensiven Variantenvielfalt der europäischen Fahrzeugkranhersteller bestehen nicht für Hersteller aus nicht oder wenig regulierten Märkten, die im Moment nicht am europäischen Markt partizipieren. Hinzu kommt, dass diese Hersteller keine zusätzlichen Kosten für die Einführung neuer Emissionsstufen in der EU aufwenden müssen. Folglich können sie kostengünstiger auf dem Weltmarkt anbieten und europäische Hersteller unter Druck setzen. Dies hätte erhebliche Auswirkungen auf die europäischen Fahrzeugkranhersteller, da der aktuelle Exportanteil von AT-Kranen bei 60 Prozent liegt.

Weiterhin haben die europäischen Fahrzeugkranhersteller auf Grund der durchgehend hohen zusätzlichen Beanspruchung der Entwicklungsabteilung mit den Umstellungen auf neue Emissionsstufen seit 2008 nicht mehr die notwendige Zeit, in großem Umfang neue Kranmodelle zu entwickeln, Kosten zu senken und Innovationen zu generieren. Diese Zeit steht den Herstellern außerhalb der EU zur Verfügung, so dass diese sich auf wirkliche Neuentwicklungen fokussieren können. Somit leidet die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Fahrzeugkran-Branche.

6 Projektion für die Umstellung Stufe IV auf Stufe V

6.1 Prognose technischer und zeitlicher Aspekte einer Umstellung auf Stufe V

Im Folgenden sind die zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der geplanten Stufe V notwendigen Änderungen bzw. Erweiterungen am Motor und dessen Abgasnachbehandlungssystems auf Basis der Datenerhebung bei den Motorenherstellern beschrieben. Darauf aufbauend (sowie auf den Angaben der eigenen Motorenlieferanten) sind von den Fahrzeugkranherstellern die Auswirkungen dieser Anpassungen auf deren AT-Krane mittels Bauraumuntersuchungen abgeleitet sowie der dafür notwendige Zeitbedarf geschätzt worden.

6.1.1 Anpassungen am Motor und Abgasnachbehandlungssystem

Nach der Veröffentlichung des ersten Vorschlags für die Abgasemissionsstufe V im Herbst 2014 [COM (2014) 581] befinden sich die Motorenhersteller noch in der Konzeptphase. Abschließende Lösungen existieren noch nicht. Ein exaktes Lieferdatum für Serienmotoren in allen Leistungsklassen für AT-Krane kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht genannt werden, da die Planungen bei den Motorherstellern noch nicht abgeschlossen sind. Die aktuelle Planung sieht den Start der Serienproduktion für Mitte 2018 vor, so dass Serienmotoren, an denen keine Änderungen mehr erfolgen, voraussichtlich ab diesem Zeitpunkt den Herstellern zur Verfügung stehen werden. Folgende technische Änderungen sind vorgesehen:

- Die bisher existierenden Konzepte beinhalten bei allen Motorenherstellern den Einsatz eines Dieselpartikelfilters zur Reduktion der Partikelemissionen. Die Motorenhersteller besitzen in unterschiedlicher Form bereits Erfahrungen mit dieser Technologie.
- Bei allen Motorenherstellern bleibt der Grundmotor voraussichtlich gleich, Änderungen am Motorblock, wie etwa eine Umstellung von V- auf Reihenmotoren, sind im Rahmen der Einführung von Stufe V nicht geplant.
- Die Zunahme der Masse des Motors und des Abgasnachbehandlungssystems bewegt sich herstellerübergreifend im Bereich bis 100 kg.
- Das Volumen des Abgasnachbehandlungssystems steigt um ca. 20%, vor allem durch einen Längenzuwachs des Systems.
- Es wird mit einem Mehrverbrauch der Harnstofflösung AdBlue gerechnet. Dies führt dazu, dass der entsprechende Tank bis zu 50% größer ausgeführt werden muss.

6.1.2 Auswirkungen der Motoranpassungen auf den All-Terrain-Kran

Die folgenden Angaben sind vorläufig und werden sich mit Änderungen / Konkretisierungen des Motorsystems noch ändern. Der Anpassungsbedarf an den unterschiedlichen AT-Kranmodellen ist sehr stark von den vorherrschenden Bauraumverhältnissen abhängig, so dass sich für jedes Kranmodell, wie auch schon in der Vergangenheit, unterschiedliche Anpassungen ergeben werden.

Konstruktive Änderungen am AT-Kran Oberwagen durch neue Motorsysteme der Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

Ausgangsbasis für die Darstellung der konstruktiven Änderungen am Oberwagen ist die Abgasemissionsstufe IV, die Anfang des Jahres 2014 in Kraft getreten ist. Abbildung 6-1 zeigt die Lage des Antriebsstrangs, die wichtigsten Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems und gibt einen generellen Einblick in die Bauraumverhältnisse auf dem Oberwagen.

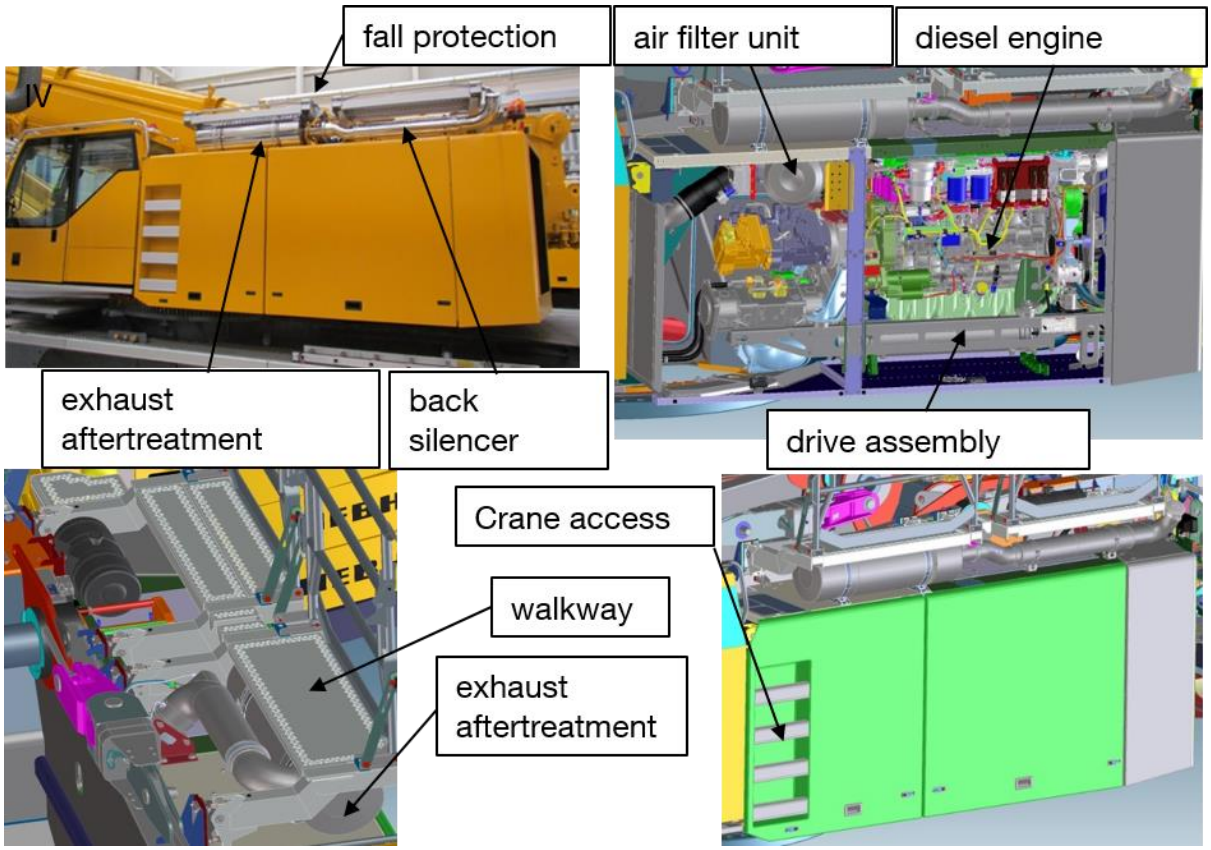

Abbildung 6-1: Aufbau Oberwagen der Emissionsstufe IV als Ausgangssituation

Bei diesem Kran ist der Motor auf der linken Seite hinter der Kabine angeordnet und das Abgasnachbehandlungssystem auf der Einhausung des Motors angebracht. Oberhalb des Abgasnachbehandlungssystems ist ein Gehsteig mit Geländer, das auf Grund der zulässigen Fahrzeughöhe von vier Metern während der Straßenfahrt umgeklappt werden muss. In Abbildung 6-2 ist eine vorläufige Einbauuntersuchung des Abgasnachbehandlungssystems für Stufe V dargestellt.

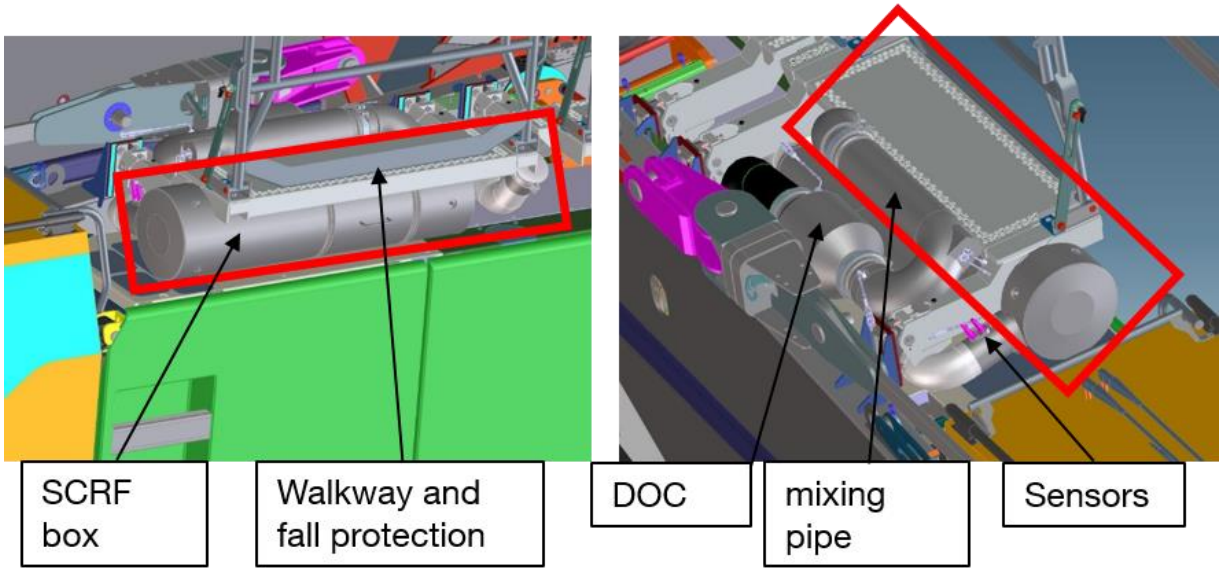

Abbildung 6-2: Einbauuntersuchung für das Abgasnachbehandlungssystem der Stufe V

In diesen ersten Einbauuntersuchungen sind bereits ähnliche Probleme wie bei der Einführung der vorherigen Emissionsstufen zu erkennen. Durch die zusätzlichen Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems kommt es in den rot markierten Bereichen zu Kollisionen mit dem Gehsteig und der Absturzsicherung. Zusätzlich wird durch den Einbau des neuen Systems die zulässige Gesamthöhe von vier Metern überschritten, was in Abbildung 6-3 im linken Bild in der Seitenansicht dargestellt wird.

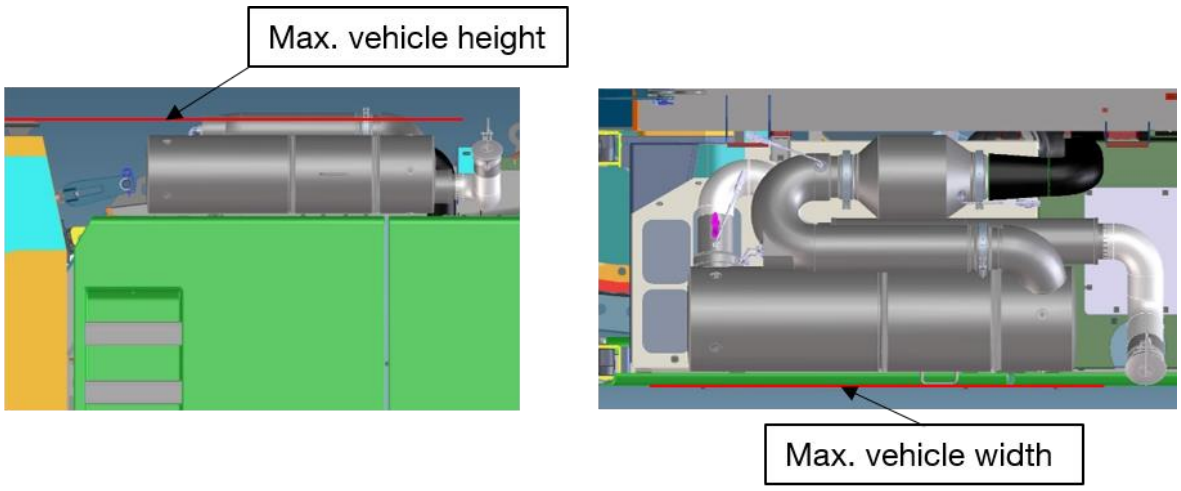

Abbildung 6-3: Einbausituation des AGN der Stufe V auf dem Oberwagen

Die Änderungen am Abgasnachbehandlungssystem erfordern auf Grund der dargestellten Kollisionen und der Überschreitungen der zulässigen Abmessungen erneut umfangreiche Konstruktionsänderungen am Oberwagen. Es ist nicht möglich, das neue Abgasnachbehandlungssystem in den aktuellen Oberwagen zu integrieren, so dass neue Konzepte hierfür entwickelt werden müssen.

Konstruktive Änderungen am AT-Kran Unterwagen mit vier Achsen durch neue Motorsysteme der Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

Neben dem Einbau in den Oberwagen bei Zwei-Motoren-Kranen, müssen die neuen Abgasnachbehandlungssysteme auch im Unterwagen integriert werden. Wie in Abschnitt 6.1.1 dargelegt, wird davon ausgegangen, dass sich der Grundmotor im Vergleich zu Stufe IV nicht ändert, sondern nur die Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems angepasst werden. In Abbildung 6-4 ist der Vergleich der Einbausituation des Motors und des Abgasnachbehandlungssystems im Unterwagen eines vierachsigen AT-Krans für die Stufe IV und die Stufe V dargestellt. Die dargestellten Komponenten sind bei Stufe V allerdings noch als Platzhalter (im Bild rot dargestellt) zu verstehen, da es noch keine endgültigen Konstruktionsdaten gibt. Insgesamt gut zu erkennen ist in beiden Fällen die genaue Einpassung des Motors und des Getriebes in den Rahmen (s. Anhang C.3).

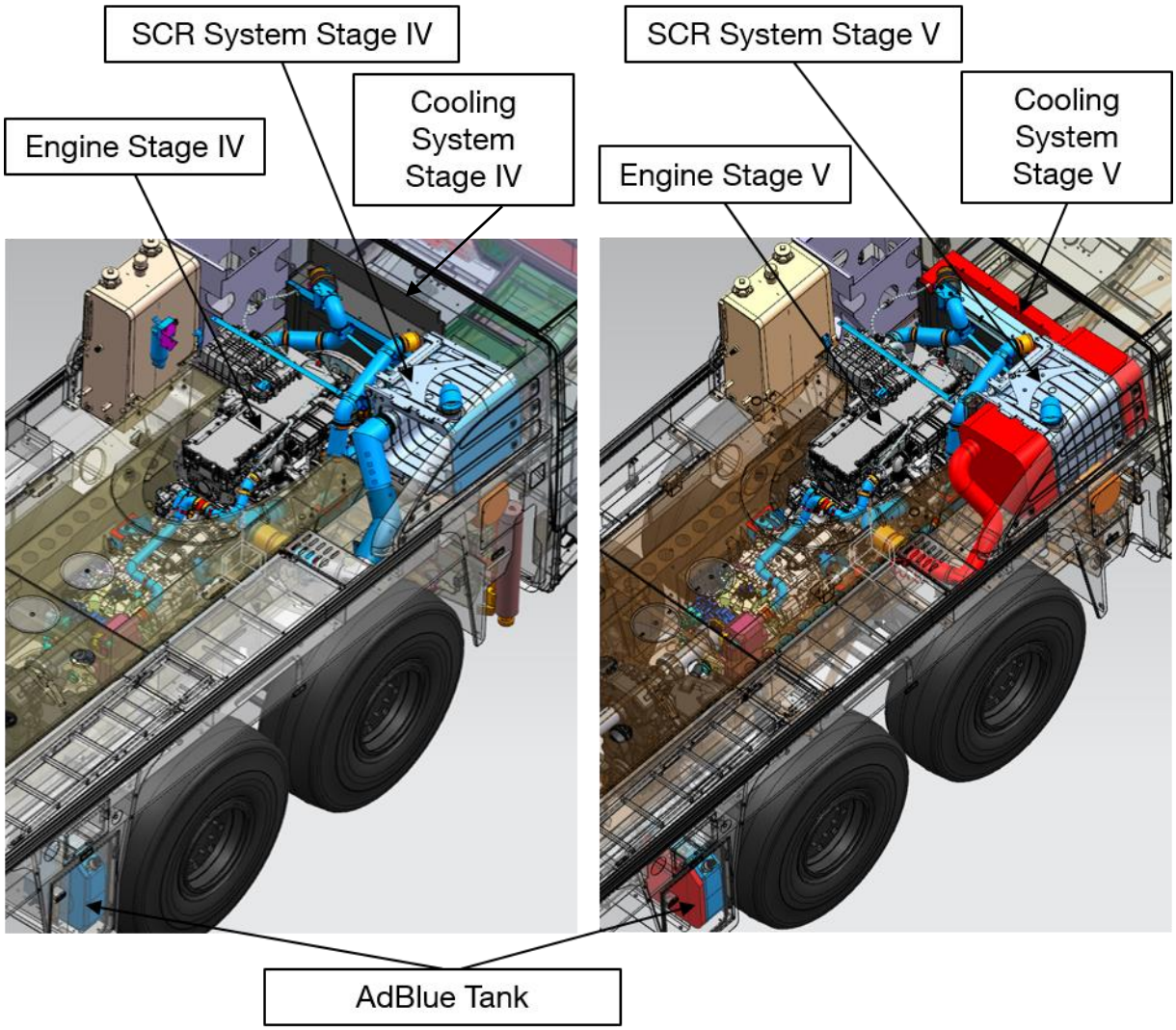

Abbildung 6-4: Vergleich der Motor- Einbausituation der Stufe IV (links) und Stufe V (rechts) im Unterwagen eines AT-Krans

Durch das im Vergleich zu Stufe IV größere Abgasnachbehandlungssystem muss die Leitungsführung vom Motor ausgehend geändert werden, um den versetzten Anschluss erreichen zu können. Daneben wird es Änderungen am Kühlsystem geben, die auf Änderungen am AGR-System zurückzuführen sind. Zusätzlich wird der AdBlue-Tank, der bei diesem Kran zwischen den Achsen untergebracht ist, nochmals größer. In Abhängigkeit der zusätzlichen Masse der neuen bzw. veränderten Komponenten, sind auch wieder Änderungen am Gegengewicht und ggf. weiteren Komponenten nötig, um die zulässigen Achslasten einhalten zu können.

Konstruktive Änderungen am AT-Kran Unterwagen mit fünf Achsen durch neue Motorsysteme der Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

Im Rahmen dieses Abschnitts wird auf Basis der zur Zeit geltenden Abgasemissionsstufe IV die Projektion für die Umstellung eines fünf-achsigen Unterwagens auf die Stufe V vorgenommen. In Abbildung 6-5 ist die Einbausituation des Abgasnachbehandlungssystems der Stufe IV auf dem Unterwagen als Ausgangspunkt dargestellt.

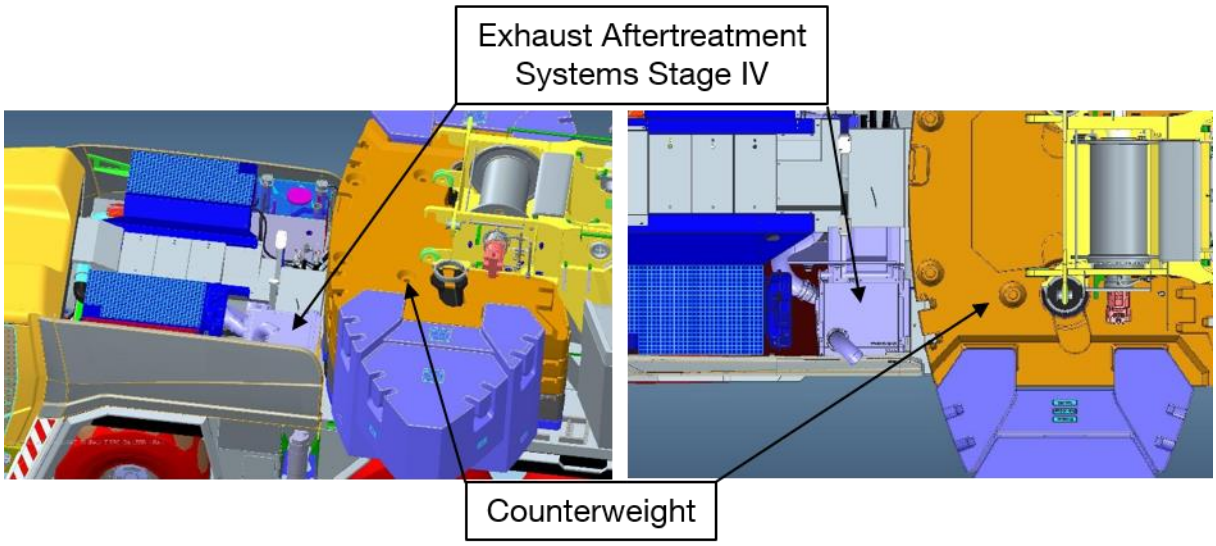

Abbildung 6-5: Einbausituation des AGN der Stufe IV im Unterwagen

Gut zu erkennen ist hier die generell enge Einbausituation der Komponenten. Die Anordnung der einzelnen Baugruppen auf dem Unterwagen ist vor allem durch die Fahrzeugabmessungen und den Schwenkbereich des Gegengewichts eingeschränkt, so dass auch hier nur ein kleiner Abstand zum Abgasnachbehandlungssystem möglich ist. Durch die Einführung der Stufe V ergeben sich allerdings deutliche Änderungen am Abgasnachbehandlungssystem. In Abbildung 6-6 ist hierzu der Vergleich des Abgasnachbehandlungssystems der Stufe IV (in blau dargestellt) mit den ersten Entwürfen für das Abgasnachbehandlungssystem der Stufe V (in grün dargestellt) in der Vorderansicht zu sehen.

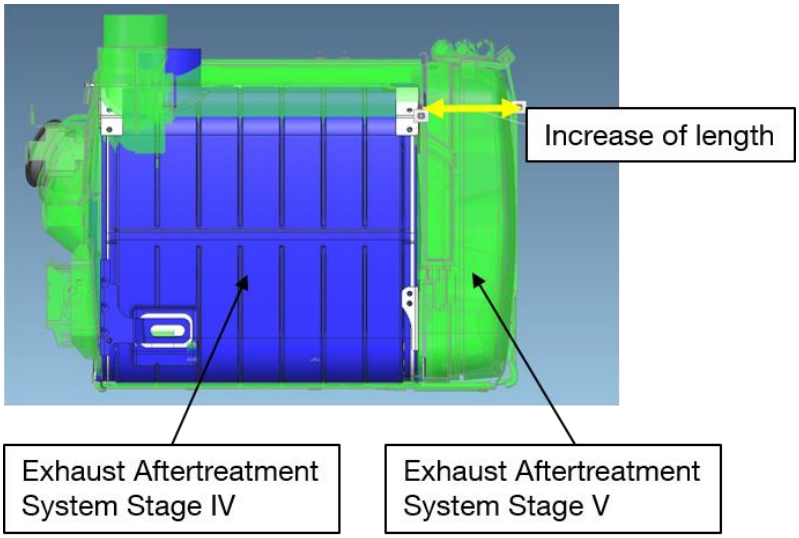

Abbildung 6-6: Vergleich zwischen dem AGN der Stufe IV und der Stufe V für den Einbau im Unterwagen

Neben der Längenzunahme beim neuen System ist in dieser Abbildung auch die geänderte Lage der Anschlüsse zu erkennen. Dies führt dazu, dass die Leitungsführung vom Motor kommend bei der Stufe V neu gestaltet und angepasst werden muss. In Abbildung 6-7 ist die Integration des ersten Entwurfs des neuen Systems auf dem fünf-achsigen Fahrgestell dargestellt.

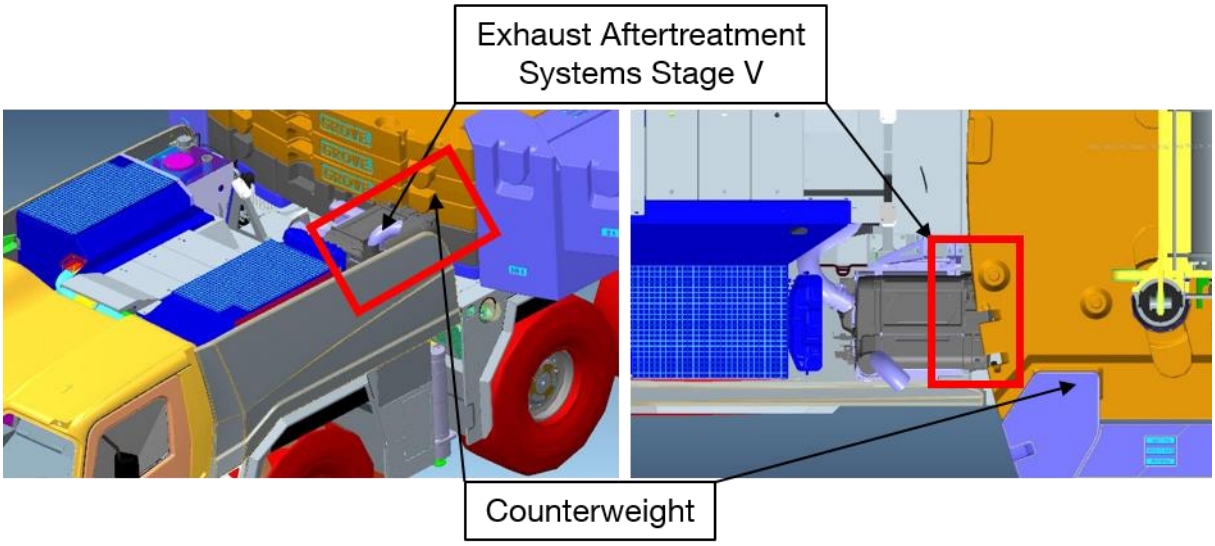

Abbildung 6-7: Aufbau Unterwagen der Emissionsstufe IV als Ausgangssituation

Problematisch ist hierbei, dass das Abgasnachbehandlungssystem durch den Längenzuwachs jetzt im Schwenkbereich des Gegengewichts liegt und mit diesem kollidiert (rot markierter Bereich). Eine Verschiebung nach vorne ist auf Grund des Anschlusses an das Abgasrohr vom Motor und des dahinter liegenden Kühlsystems kaum realisierbar. Damit bedingen die Änderungen an der Abgasnachbehandlung erneut eine umfangreiche Änderung an der Unterwagenkonstruktion.

Fazit

Durch die Veränderungen des Abgasnachbehandlungssystems beim Übergang auf Stufe V (vor allem Zunahme des Volumens bzw. der Länge) sind für dessen Einbau erneut Konstruktionsanpassungen am Kran notwendig, die beispielhaft an Ober- und Unterwagen aufgezeigt wurden. Diese Anpassungen ergeben sich vor allem aus den Beschränkungen der Gesamthöhe und -breite für AT-Krane, die für die Zulassung auf öffentlichen Straßen nicht überschritten werden dürfen, sowie aus Kollisionen, die die neuen Systeme mit bestehenden Baugruppen verursachen.

6.1.3 Prognose zeitlicher Aspekte für die Einführung der Stufe V bei All-Terrain-Kranen

Auf Grundlage dieser ersten Bauraumuntersuchungen stehen die Hersteller mit einigen ihrer AT-Kranmodellen wieder vor technisch schwer zu lösenden Problemen. Wie auch schon bei den vorhergehenden Umstellungen, können die Hersteller aus technischen Gründen einige Kranmodelle nicht auf die geplante Stufe V umstellen, ohne dass umfangreiche Neukonstruktionen des Ober- als auch Unterwagens erforderlich werden. Der Umfang für die Anpassungen aller AT-Kranmodelle wird ähnlich der Umstellung von Stufe III A auf III B geschätzt. Mit Stufe V kommt eine zusätzliche neue Hauptkomponente (DPF) hinzu. Der Grundmotor bleibt erhalten. Auf Grund des jetzt schon durch das SCR-System beschränkten Bauraums im AT-Kran, wird es für die Hersteller immer schwieriger neue Komponenten zu integrieren und dabei das zulässige Gesamtgewicht und die Achslasten nicht zu überschreiten.

Die Fahrzeugkranhersteller gehen davon aus, dass sie drei Jahre ab der Verfügbarkeit der Serienmotoren Ende 2018 benötigen, um ihre AT-Krane auf die neue Emissionsstufe V umzustellen.

Auf Grundlage der geplanten Übergangszeit im Vorschlag der EK [SWD (2014) 281] zur Einführung der Stufe V (vgl. Abbildung 2-4) von einem Jahr ist es den Herstellern nicht möglich, zum Stichtag 01.01.2020 ihr gesamtes Produktportfolio von aktuell 44 AT-Kranmodellen umgestellt zu haben. Auch die Darstellung der zeitlichen Aspekte in der Folgenbewertung (vgl. Kapitel 5.2) hat gezeigt, dass die Hersteller sowohl für die Umstellung von Stufe III A auf III B als auch für die Umstellung von III B auf IV mehr als zwei Jahre Zeit ab Verfügbarkeit der Serienmotoren gebraucht haben (vgl. Abbildung 5-3).

Bleibt es bei einer Übergangszeit von einem Jahr für die Umstellung der Maschinen, geben die Hersteller an, lediglich ein Drittel ab Beginn der Stufe V im Jahr 2019 umstellen zu können sowie im zweiten und dritten Jahr jeweils wieder ein Drittel auf die neue Emissionsstufe anpassen zu können.

6.2 Prognose ökonomischer Auswirkungen für die Einführung der Stufe V bei All-Terrain-Kranen

Da sowohl der konstruktive Aufwand als auch die notwendige Zeit für die Anpassungen am AT-Kran auf die neue Stufe V ähnlich hoch wie bei der Umstellung von Stufe III A auf III B geschätzt werden, gehen die Unternehmen von der gleichen Kostenbelastung aus (vgl. Kapitel 5.3). Jedoch werden die Hersteller auf Grundlage der zeitlichen Prognose bei einem Übergangszeitraum von einem Jahr zwei Drittel ihrer AT-Krane nicht umstellen können und somit nicht in der EU verkaufen dürfen. Auf Grund ähnlichen Randbedingungen und Restriktionen lässt sich diese Aussage im Wesentlichen auf alle Fahrzeugkrantypen übertragen. Bei einem Exportanteil aus der EU von 60 Prozent werden 40 Prozent der Fahrzeugkrane der europäischen Hersteller in Europa verkauft. Diese Umsätze in Europa würden im ersten Jahr nach Start der Stufe V zu zwei Drittel und im zweiten Jahr zu einem Drittel wegfallen. Das entspricht in Summe einem Umsatzverlust für die gesamte europäische Fahrzeugkran-Branche von über 1 Mrd. €. Diese fehlenden Umsätze würden zu einer finanziellen Schwächung der Unternehmen führen und voraussichtlich auch einen entsprechenden Abbau von Arbeitsplätzen zur Folge haben.

Weiterhin würde sich mit der neuen Stufe V die Anzahl der Derivate für die Krane weiter erhöhen. Da im Moment keine Harmonisierung mit den USA in Planung ist, müssten die Kranhersteller drei unterschiedliche Varianten ihrer Kranmodelle anbieten:

- Stufe V in der Europäischen Union
- Tier 4 final in den USA (+regulierte Märte)
- Stufe III A für nicht regulierte Märkte

Die zusätzlichen Kosten für die Umstellung und Variantenvielfalt sowie die fehlenden Umsätze im EU-Markt würden die europäischen Hersteller wirtschaftlich und im Wettbewerb zu internationalen Anbietern schwächen. Dies hätte zur Folge, dass außereuropäische Anbieter in nicht regulierte Märkte einsteigen oder bestehende Anbieter ihre Position weiter ausbauen können. Als Folge daraus würde die Marktposition der europäischen Hersteller gefährdet werden.

Verstärkt werden könnten diese Effekte durch die fehlende Innovationskraft der europäischen Fahrzeugkranhersteller, weil diese zum Großteil weiterhin ihre Entwicklungsressourcen in die Umstellung der Fahrzeugkrane auf neue Emissionsstufen investieren müssen. Die Hersteller würden, wie auch bei den beiden vorhergehenden Umstellungen (vgl. Abbildung 5-3), wieder zwei bis drei Jahre vor Start der neuen Emissionsstufe mit der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit für die Umstellung

auf Stufe V ihrer Krane beginnen. Das hätte zur Folge, dass herstellerübergreifend Anteile der Entwicklungskapazitäten seit dem Jahr 2008 bis 2022 durchgehend in der Umstellung auf neue Emissionsstufen gebunden wären und diese Kapazität für Innovationen fehlt.

Weil die Hersteller, der zeitlichen Prognose folgend, in der EU nur ein Drittel ihrer AT-Krane im ersten Jahr und zwei Drittel im zweiten Jahr nach Einführung der Stufe V verkaufen dürften, könnten entsprechend die Betreiber nur mit den zur Verfügung stehenden AT-Kranen ihren Bestand an alten Maschinen auch nur zu einem Drittel im ersten Jahr und zu zwei Dritteln im zweiten Jahr ersetzen. Dies hätte zur Folge, dass ältere Maschinen mit schlechteren Emissionsgrenzwerten weiterhin in der EU betrieben und nicht wie üblich in den Rest der Welt abwandern würden. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen sowohl auf die Umwelt als auch auf die Gesundheit und die Gesellschaft werden in den Kapiteln 6.4 und 6.5 betrachtet. Hierzu dienen die im folgenden Kapitel erstellten Szenarien für unterschiedlich lange Umstellungszeiträume.

6.3 Szenarien-Generierung für die Umstellung auf die Stufe V

Als Grundlage für die Darstellung der Auswirkungen der Einführung der Abgasemissionsstufe V bei AT-Kranen hinsichtlich der entstehenden Kosten und der Verbesserung bei den Schadstoffemissionen werden im Folgenden vier unterschiedliche Szenarien generiert und miteinander verglichen. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf die Zeitspanne, in der die Umstellung auf die Stufe V durchgeführt werden muss. Für die zeitliche Betrachtung werden die Eckdaten der Einführung für den Leistungsbereich von Motoren mit 130-560 kW angenommen, da dieser Leistungsbereich in AT-Kranen den höchsten Anteil besitzt.

Szenario 1

Das Szenario 1 wird auch als Business-As-Usual-Szenario (BAU) angesehen, in dem die Stufe V überhaupt nicht eingeführt wird. Das bedeutet, dass auch über das Jahr 2020 hinaus Motoren und Krane mit der Abgasemissionsstufe IV produziert und in der Europäischen Union verkauft werden dürfen. In Abbildung 6-8 ist der zeitliche Ablauf für dieses Szenario schematisch für die Jahre 2018 bis 2022 dargestellt.

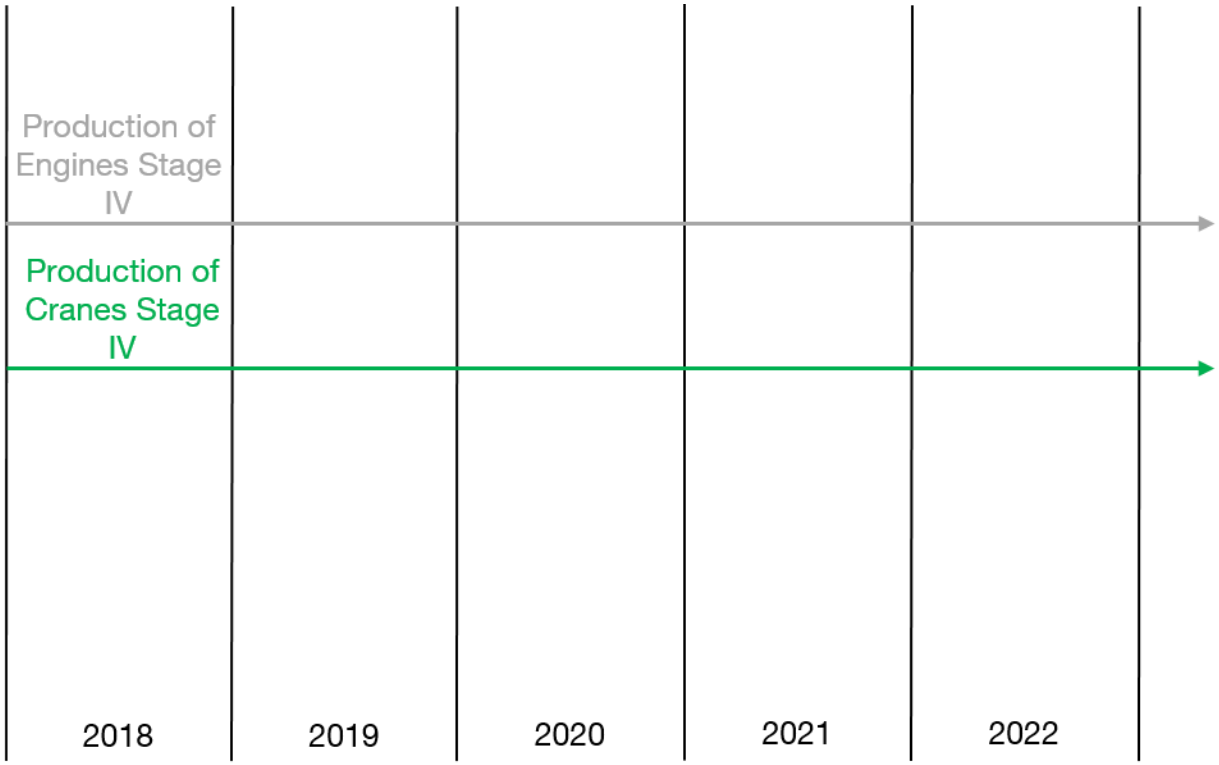

Abbildung 6-8: Zeitlicher Ablauf Szenario 1

Dieses Szenario dient vor allem dem Vergleich, welche Auswirkungen die Einführung der Stufe V auf die Partikel- und Stickoxidemissionen aus dem Dieselmotor hat. Die bisher generierten Verbesserungen durch die Einführung der Abgasemissionsstufen bis Stufe IV kann dem Abgasemissionsinventar in Kapitel 4 entnommen werden. An dieser Stelle dient dieses Szenario lediglich als Vergleichsgröße für die Einführung der Stufe V.

Szenario 2

Das Szenario 2 unterscheidet sich von Szenario 1 durch die Einführung der Stufe V. Bei diesem Szenario wird von der Idealvorstellung ausgegangen, dass die Umstellung aller AT-Krane innerhalb eines Jahres zu bewerkstelligen ist. Dabei wird zugrunde gelegt, dass die Motoren im Jahr 2018 serienreif für AT-Krane zur Verfügung stehen und das Jahr 2019 für die Umkonstruktion der Krane verwendet werden kann. Ab dem Jahr 2020 werden dann nur noch Maschinen mit der Abgasemissionsstufe V in der Europäischen Union verkauft. In Abbildung 6-9 wird der zeitliche Verlauf für das Szenario 2 dargestellt.

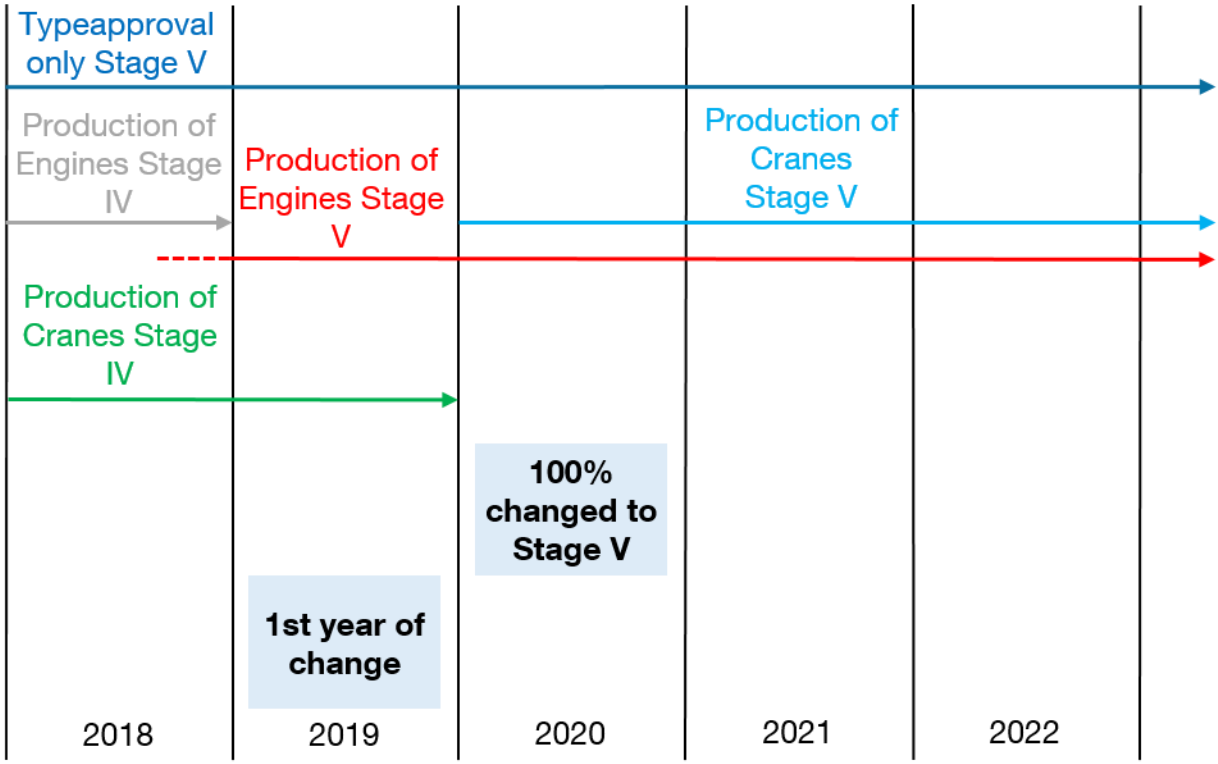

Abbildung 6-9: Zeitlicher Ablauf Szenario 2

Ab Anfang 2018 ist die Typgenehmigung nur noch für Motoren der Abgasemissionsstufe V möglich, Motoren mit der auslaufenden Stufe IV dürfen aber noch bis Ende des Jahres 2018 produziert werden. Für Krane, in die diese Motoren eingebaut werden, ist dieser Endpunkt um ein Jahr versetzt. Krane dürfen noch bis Ende des Jahres 2019 mit der Stufe IV gebaut werden. Parallel dazu werden ab dem Jahr 2019 nur noch Motoren der Stufe V produziert und die Krane umgestellt. Auf Basis der Erfahrungen aus den letzten Umstellungen auf die Emissionsstufen III B und IV wird dieses Szenario von den Kranherstellern allerdings als nicht umsetzbar angesehen, da auf Grund der umfangreichen Änderungen an den Maschinen, in einem Jahr nur ca. ein Drittel des Produktportfolios geändert werden kann.

Szenario 3

In der Definition von Szenario 3 wird den Erfahrungen der Kranhersteller aus den Umstellungen für die Stufen III B und IV Rechnung getragen und untersucht, welche Auswirkungen eine Übergangszeit für die Umstellung von drei Jahren zeigt. Die Randbedingungen hinsichtlich Typgenehmigung und Lieferzeitpunkten für neue Motoren mit der Abgasemissionsstufe V werden im Vergleich zu Szenario 2 nicht geändert. Abbildung 6-10 zeigt schematisch den zeitlichen Verlauf für die Einführung der Stufe V für das Szenario 3.

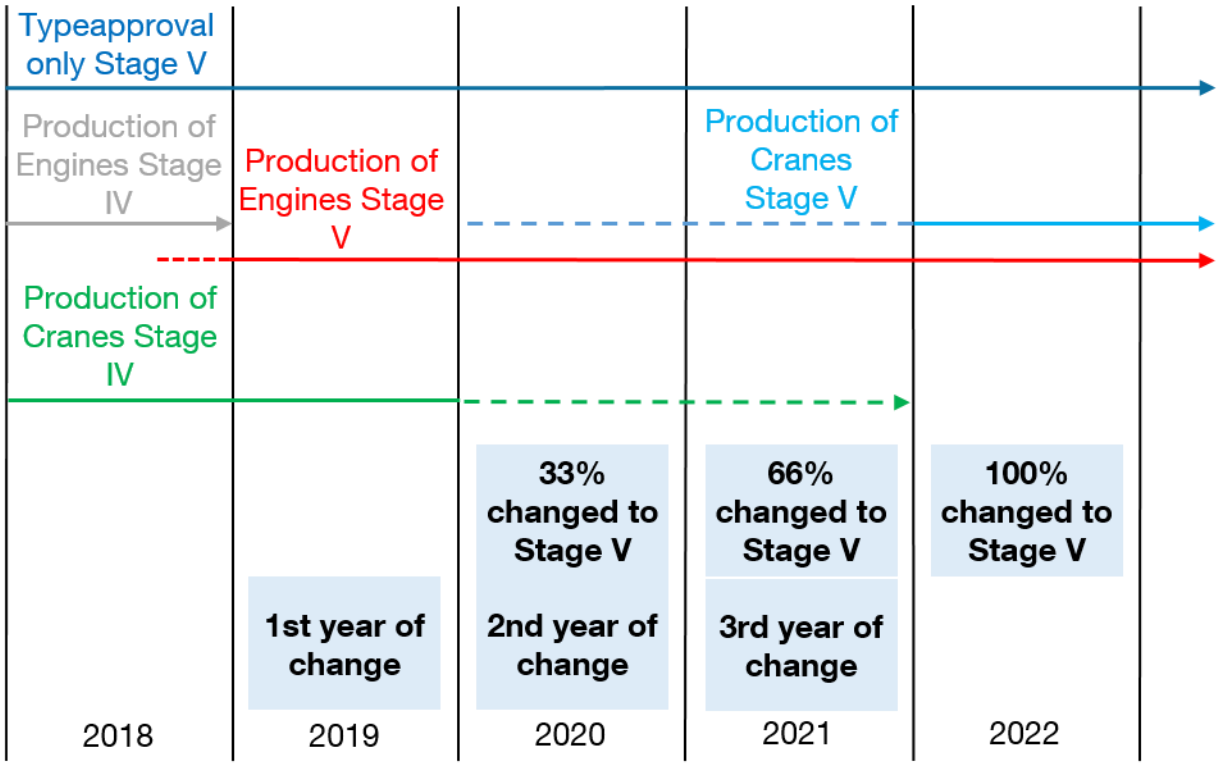

Abbildung 6-10: Zeitlicher Ablauf Szenario 3

Der maßgebende Unterschied zu Szenario 2 betrifft die Übergangszeit für das Inverkehrbringen von Kranen mit der alten Emissionsstufe IV. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass in einem Jahr nur ein Drittel des Produktportfolios der Kranhersteller auf die neue Stufe umgerüstet werden kann. Das bedeutet, dass im Jahr 2019 das erste Drittel der AT-Kranmodelle umgestellt und im Jahr 2020 verkauft werden kann. Die restlichen Modelle werden weiterhin mit der Stufe IV ausgeliefert. Im Jahr 2020 wird das zweite Drittel des Portfolios umgestellt, so dass im Jahr 2021 insgesamt zwei Drittel der Modelle mit Stufe V und ein Drittel noch mit Stufe IV in den Markt gebracht werden. Im Jahr 2021 wird dann das letzte Drittel der Krane umgestellt, so dass ab dem Jahr 2022 nur noch Krane mit der Abgasemissionsstufe V in der Europäischen Union ausgeliefert werden.

Szenario 4

Das Szenario 4 definiert die Schnittmenge aus den Szenarien 2 und 3. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Umstellung innerhalb eines Jahres vollzogen werden muss, die reale Umstellungszeit aber drei Jahre beträgt. In Abbildung 6-11 wird der zeitliche Ablauf von Szenario 4 schematisch dargestellt.

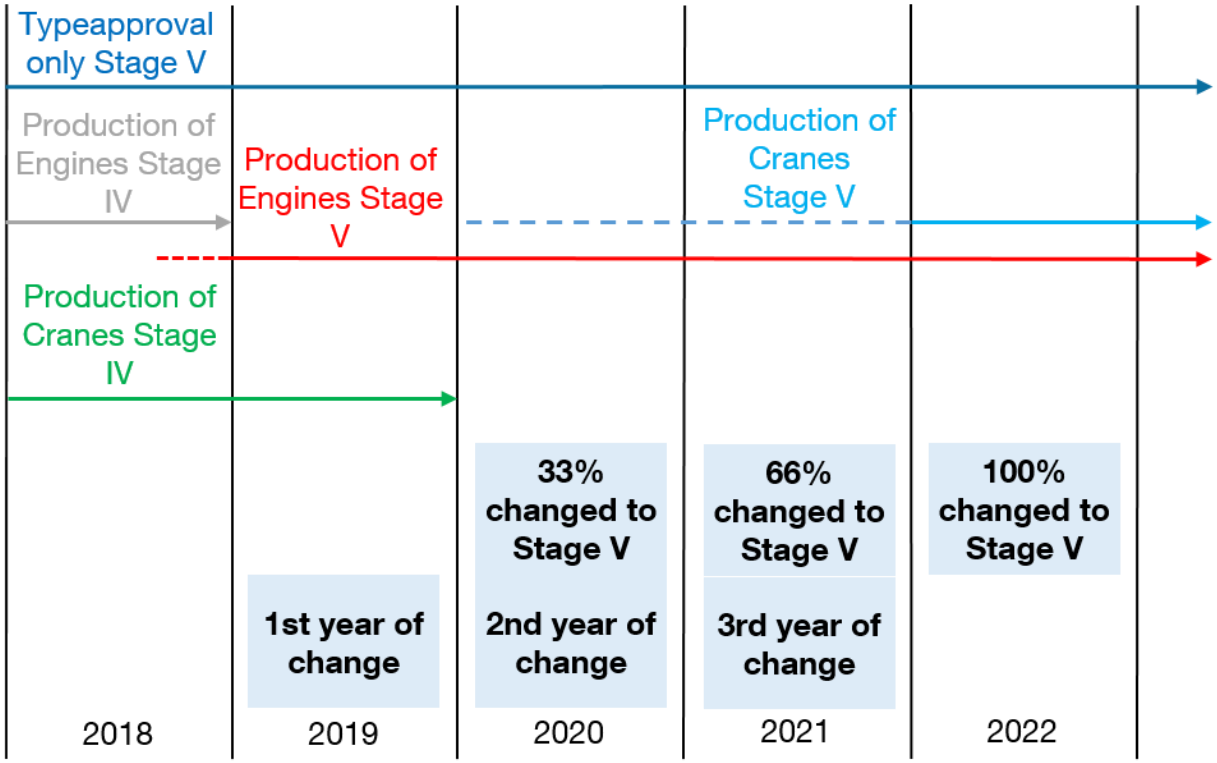

Abbildung 6-11: Zeitlicher Ablauf Szenario 4

Als Auswirkungen ergeben sich, dass im Jahr 2020 nur ein Drittel der AT-Kranmodelle auf Stufe V umgestellt ist und damit in Europa in den Verkehr gebracht werden darf. Die restlichen Kranmodelle, die in diesem Jahr verkauft werden könnten, stehen auf Grund der fehlenden Umstellung nicht zur Verfügung. Im Jahr 2020 kann das zweite Drittel der Modelle geändert werden, so dass im Jahr 2021 insgesamt erst zwei Drittel des Produktportfolios zur Verfügung stehen. Ab dem Jahr 2022 sind alle Kranmodelle auf die Stufe V umgestellt und wieder in der vollen Stückzahl verfügbar. Die Nicht-Verfügbarkeit von Kranen in den Jahren 2020 und 2021 hat sowohl deutliche Auswirkungen auf die Emissionen von Partikeln und Stickoxiden als auf den Umsatz der Kranhersteller. Im Folgenden werden die in diesem Abschnitt definierten Szenarien hinsichtlich der Partikel- und Stickoxidemissionen miteinander verglichen. Ziel dabei ist es darzustellen, welche Auswirkungen die Festlegung der Übergangszeit, in der noch Maschinen mit der Stufe IV nach Einführung der Stufe V in den Verkehr gebracht werden dürfen, auf die Emissionen hat.

6.4 Trend-Impact Analysis zur Ermittlung des Abgasemissionsinventars und Bestimmung der Auswirkungen auf die Umwelt für generierte Szenarien

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 6.3 vorgestellten Szenarien hinsichtlich der Auswirkungen auf die Emissionen von Partikeln und Stickoxiden untersucht. Ausgangspunkt für diesen Vergleich ist das Jahr 2020, wobei sich der Untersuchungszeitraum bis zum Jahr 2050 erstreckt. Für die Szenarien 1 bis 3 ergeben sich keine Veränderungen der Bestandsstruktur der Maschinen, da immer alle Modelle verfügbar sind und somit alte Krane ausgetauscht werden können. Da bei Szenario 4 in den Jahren 2020 und 2021 nicht alle Kranmodelle mit der vollen Stückzahl verkauft werden können, da sie nicht den Anforderungen an die aktuellste Abgasemissionsstufe genügen, ergeben sich hier auch Veränderungen in der Bestandsstruktur. In Abbildung 6-12 ist die Altersstruktur im Jahr 2025 für das Szenario 4 verglichen mit dem Szenario 3 dargestellt.

Abbildung 6-12: Vergleich der Altersstruktur von Szenario 3 und Szenario 4 im Jahr 2025

Deutlich zu erkennen ist die Nicht-Verfügbarkeit von Kranen aus den Jahren 2020 und 2021, die in dieser Zeit nicht auf die neueste Abgasemissionsstufe V umgestellt werden konnten. Der Ansatz für den Austausch von Altgeräten wird so gewählt, dass mit den verfügbaren Kranen in den Jahren 2020 und 2021 immer die ältesten Maschinen ausgetauscht werden, so weit dies die verfügbare Stückzahl zulässt. Dies führt innerhalb des definierten Szenarios dennoch dazu, dass ältere Krane, die normalerweise durch neue Modelle ersetzt würden, nicht ausgetauscht werden kön-

nen und so noch einige Jahre im Bestand verbleiben. Diese Krane erfüllen nicht die neuesten Emissionsstandards, was sich insgesamt negativ auf den Ausstoß von Partikeln und Stickoxiden auswirkt. Die den anderen Szenarien zugrunde liegende Altersstruktur wird durch den schrittweisen Austausch von Geräten erst wieder im Jahr 2041 erreicht.

6.4.1 Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen der Szenarien im Vergleich

Die Auswirkungen hinsichtlich Stickoxidemissionen sind in Abbildung 6-13 und für Partikelemissionen in Abbildung 6-14 als Vergleich der Szenarios dargestellt.

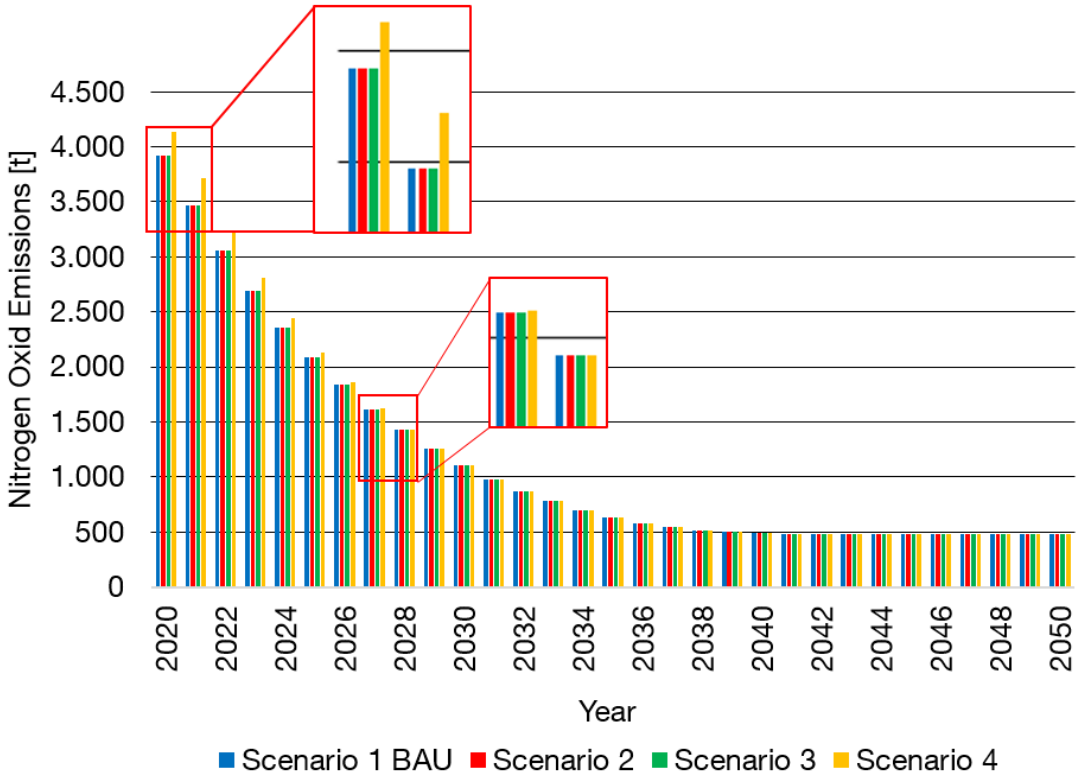

Abbildung 6-13: Entwicklung der Stickoxidemissionen im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 in der Europäischen Union

In dieser Darstellung ist deutlich erkennbar, dass sich im projizierten Zeitraum von 2020 bis zum Jahr 2050 keine Verbesserungen durch die Einführung von Stufe V hinsichtlich der Stickoxidemissionen ergeben, da die Grenzwerte im Vergleich zur Stufe IV nicht verändert werden. Dies führt dazu, dass sich die Szenarien 1 bis 3 nicht unterscheiden, da für alle derselbe Grenzwert zugrunde gelegt wird. Für das Szenario 4 ergibt sich in den ersten Jahren nach der Einführung der Stufe V hingegen ein höherer Ausstoß von Stickoxiden, da im Vergleich zu den anderen Szenarien alte Maschinen länger im Bestand bleiben müssen, nachdem sie in den Jahren 2020 und 2021 nicht durch neue Geräte ersetzt werden können.

6.4.2 Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen der Szenarien im Vergleich

Im Bereich der Partikelemissionen ergibt sich ein etwas differenzierteres Bild, da durch die Einführung der Stufe V der Grenzwert für die Partikelemissionen im Vergleich zu Stufe IV nochmals verschärft wird. In Abbildung 6-14 ist der Vergleich der Szenarien hinsichtlich der Partikelemissionen im Betrachtungszeitraum der Jahre 2020 bis 2050 dargestellt.

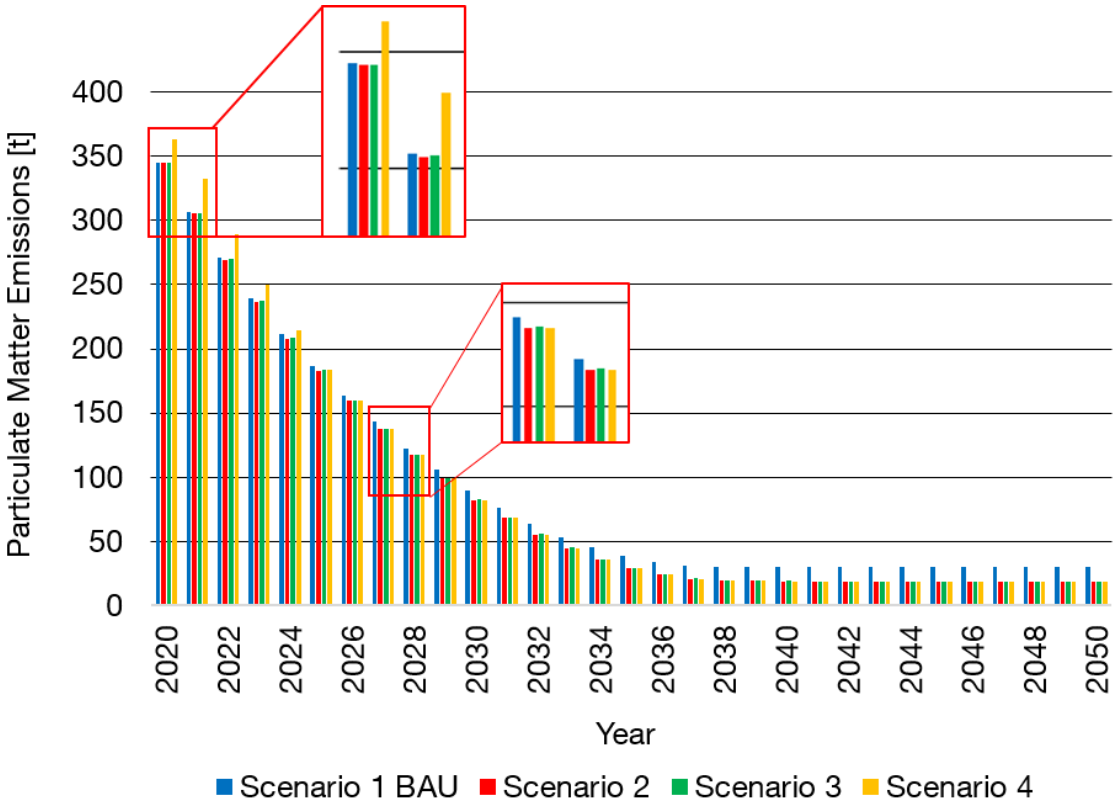

Abbildung 6-14: Entwicklung der Partikelemissionen im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 in der Europäischen Union

In dieser Abbildung kennzeichnen die blauen Balken das Szenario 1 – Business as Usual (BAU), bei dem auf die Einführung der Stufe V für AT-Krane vollständig verzichtet wird. Dieses Szenario dient im Folgenden als Vergleichsgröße für die Betrachtung der Szenarien 2 bis 4 hinsichtlich der Entwicklung der Partikelemissionen. Bei Szenario 2 wird davon ausgegangen, dass die Einführung der Stufe V von den Herstellern von AT-Kranen innerhalb eines Jahres zu bewältigen ist. Dies führt dazu, dass die Emissionen mit steigender Durchdringung der Population mit Maschinen der Stufe V langsam unter das Niveau des Szenarios 1 sinken. Ab dem Jahr 2045 ergibt sich keine weitere Emissionsminderung, da ab diesem Zeitpunkt alle alten Maschinen mit schlechterer Emissionsstufe ersetzt sind. Aus den Erfahrungen zum Zeitbedarf für die jüngsten Umstellungen auf die Stufen III B und IV (siehe Kapitel 5.2) wird dieses Szenario von den Kranherstellern als nicht erreichbar angesehen. Daher wird in Szenario 3 untersucht, welche Auswirkungen die Ausweitung der

Übergangsfrist auf drei Jahre hinsichtlich der Partikelemissionen hervorruft. Insgesamt zeichnet sich ein ähnliches Bild zu Szenario 2 ab. Die Emissionen sinken langsam unter das Niveau von Szenario 1, ein signifikanter Unterschied, ob den Herstellern für die Umstellung der Maschinen nur ein Jahr wie in Szenario 2 oder drei Jahre eingeräumt werden, ist in dieser Betrachtung nicht erkennbar, die Emissionen der Population liegen auf einer vergleichbaren Größenordnung. Ab dem Jahr 2047 sind in diesem Szenario auch nur noch Maschinen mit der Abgasemissionsstufe V anzutreffen, so dass sich bis zum Jahr 2050 keine weiteren Einsparungen ergeben. Da bei Szenario 4 davon ausgegangen wird, dass die geforderte Umstellungszeit von einem Jahr nicht eingehalten werden kann und damit im Jahr 2020 nur 33 % der Kranmodelle und im Jahr 2021 nur 66 % der Kranmodelle verfügbar sind, die alte Maschinen ersetzen, ergibt sich in den ersten Jahren sogar ein höherer Partikelausstoß, als bei Szenario 1, bei dem die Stufe V gar nicht eingeführt wird. Erst mit weiterer Durchdringung der Population mit Maschinen der Stufe V wird das Niveau von Szenario 1 erreicht, um in den folgenden Jahren auf den Emissionswert der Szenarien 2 und 3 zu gelangen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Übergangszeit für die Einführung der Stufe V erhebliche Auswirkungen hinsichtlich der Emissionen haben kann. Wird dieser Zeitraum zu knapp gewählt, können bis zum Ende der Übergangsfrist im schlimmsten Fall nicht alle Maschinen umgestellt werden. Dies führt dazu, dass alte Maschinen länger im Bestand bleiben müssen, die einen höheren Schadstoffausstoß aufweisen. Die Unterschiede zwischen einer Übergangszeit von drei Jahren verglichen mit einem Jahr, sofern in einem Jahr die Umstellung machbar wäre, sind nur marginal. Schlussendlich wird bei beiden Szenarien das gleiche geringe Emissionsniveau bereits im Jahr 2041 für Stickoxide und im Jahr 2047 für Partikelemissionen erreicht.

6.5 Cost-Effectiveness Analysis zur Bestimmung der Auswirkungen auf Gesellschaft und Gesundheit der generierten Szenarien

Um die in Kapitel 6.3 erstellten Szenarien hinsichtlich der sozialökonomischen Auswirkungen zu bewerten, werden die monetarisierten Auswirkungen der Einführung von PN Grenzwerten für die Fahrzeugkran-Branche anhand der erstellten Szenarien berechnet. Das Berechnungsvorgehen sowie die getroffenen Annahmen sind im Anhang F hinterlegt. Tabelle 6-1 zeigt den Nettonutzen und das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Gesellschaft für die Szenarien 2, 3 und 4. Die Kosten bei dieser Betrachtung entstehen bei den Motoren- und Fahrzeugkranherstellern für die Umsetzung der Stufe V

Tabelle 6-1: Kosten-Nutzen Verhältnis der erstellten Szenarien für die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte für AT-Krane mit Betrachtung der Kosten für Motoren- und Fahrzeugkranhersteller

	Proposal SWD (2014) 281 for NRMM	**Scenario 2*[1]**	**Scenario 4*[2]**	**Scenario 3*[3]**
Category [kW]	56 - 560	56 - 560	56 - 560	56 - 560
Reference period	2020-2050	2020-2050	2020-2050	2020-2050
INCREMENTAL COMPLIANCE COSTS				
Development and production costs (engine manufacturer)	371 m€	33,88 m€	33,88 m€	33,88 m€
Redesign and adaption costs (machinery manufacturer)	332 m€	32,15 m€	32,15 m€	32,15 m€
Operational costs (user)	-	-	-	-
Total costs	**703 m€**	**66,03 m€**	**66,03 m€**	**66,03 m€**
INCREMENTAL BENEFITS				
Reduction of PM2.5 emissions, in 2040 vs. BAU	-1.380 t/y	-11 t/y	-11 t/y	-11 t/y
Monetised impact for PM2.5	2.294 m€	17,04 m€	6,28 m€	16,08 m€
Total benefits	**2.297 m€**	**17,04 m€**	**6,28 m€**	**16,08 m€**
BENEFIT-COST CALCULATION				
Net impact for society (NPV)	**1.591 m€**	**-48,99 m€**	**-59,75 m€**	**-49,95 m€**
Benefit/Cost ratio	226%	-74%	-90%	-76%
Specific $PM_{2.5}$ in year 2020 / 2050 (cf. chapter 4.2)	60.200t / 1.380t	347t (0,57%) / 18t (1,30%)	366t (0,61%) / 18t (1,30%)	348t (0,57%) / 18t (1,30%)

*[1] **Szenario 2**: AT-Krane Übergangsphase 12 Monate; Umstellungszeitraum 12 Monate; Ergebnis: ab 2020 nur Krane mit Stufe V in der EU

*[2] **Szenario 4**: AT-Krane Übergangsphase 12 Monate; Umstellungszeitraum 36 Monate; Ergebnis: ab 2020 1/3 Krane mit Stufe V und 0 Stufe IV; ab 2021 2/3 mit Stufe V und 0 Stufe IV; ab 2022 alle Stufe V in der EU; Nichtverfügbarkeit und Verkauf 2020 und 2021 nicht umgestellte Krane

*[2] **Szenario 3**: AT-Krane Übergangsphase 36 Monate; Umstellungszeitraum 36 Monate; Ergebnis: ab 2020 1/3 Krane mit Stufe V und 2/3 Stufe IV; ab 2021 2/3 mit Stufe V und 1/3 Stufe IV; ab 2022 alle Stufe V in der EU

Der dadurch generierte Nutzen entsteht durch die Vermeidung von Abgasemissionen in der Gesellschaft (vermiedene Luftverschmutzungskosten). Die konkreten, für diese Berechnung angesetzten Kosten, die den Nutzen darstellen, sind die vermiedenen Gesundheitskosten, welche größtenteils durch Partikelemissionen verursacht werden. [CEDe-2011] Der berechnete Nettonutzen für die Gesellschaft (NVP), bei einer Einführung der Emissionsstufe V für AT-Krane in Europa, ist für alle drei Szenarien negativ. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis liegt bei allen drei Szenarien bei minus 70 Prozent. Dazu ist im Vergleich die Angabe des Nettonutzens für die gesamten mobilen Maschinen und Geräte mit Motoren im Leistungsbereich 56–560 kW aus der Berechnung der Europäischen Kommission im Impact Assessment [SWD (2014)

281] zum Vorschlag der neuen Stufe V [COM (2018) 581] in der ersten Spalte dargestellt.

Die Tabelle 6.2 zeigt die gleiche Berechnung, diesmal jedoch nur mit kalkulierten Kosten für die Fahrzeugkranhersteller für die Umstellung aller AT-Kranmodelle. Selbst bei einer alleinigen Betrachtung der Kosten nur für die Fahrzeugkranhersteller ist der Nettonutzen für die Gesellschaft negativ. Dies liegt darin begründet, dass der Anteil an den PM-Emissionen von AT-Kranen relativ gering ist. Die für die Umstellung auf die neue Stufe V entstehenden Aufwände bei den Herstellern aber hoch sind.

Tabelle 6-2: Kosten-Nutzen Verhältnis der erstellten Szenarien für die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte für AT-Krane mit Betrachtung der Kosten nur für Fahrzeugkranhersteller

	Option 3 SWD (2014) 281	**Scenario 2**	**Scenario 4**	**Scenario 3**
Category	56 - 560	56 - 560	56 - 560	56 - 560
Reference period	2020-2050	2020-2050	2020-2050	2020-2050
INCREMENTAL COMPLIANCE COSTS				
Development and production costs (engine manufacturer)	371 m€	-	-	-
Redesign and adaption costs (machinery manufacturer)	332 m€	32,15 m€	32,15 m€	32,15 m€
Operational costs (user)	-	-	-	-
Total costs	**703 m€**	**32,15 m€**	**32,15 m€**	**32,15 m€**
INCREMENTAL BENEFITS				
Reduction of PM2.5 emissions, in 2040 vs. BAU	-1.380 t/y	-11 t/y	-11 t/y	-11 t/y
Monetised impact for PM2.5	2.294 m€	17,04 m€	6,28 m€	16,08 m€
Total benefits	**2.297 m€**	**17,04 m€**	**6,28 m€**	**16,08 m€**
BENEFIT-COST CALCULATION				
Net impact for society (NPV)	**1.591 m€**	**-15,11 m€**	**-25,87 m€**	**-16,07 m€**
Benefit/Cost ratio	226%	-47%	-80%	-50%
Specific $PM_{2.5}$ in year 2020 / 2050 (cf. chapter 4.2)	60.200t / 1.380t	347t (0,58%) / 18t (1,30%)	366t (0,61%) / 18t (1,30%)	348t (0,58%) / 18t (1,30%)

*1 **Szenario 2**: AT-Krane Übergangsphase 12 Monate; Umstellungszeitraum 12 Monate; Ergebnis: ab 2020 nur Krane mit Stufe V in der EU

*2 **Szenario 4**: AT-Krane Übergangsphase 12 Monate; Umstellungszeitraum 36 Monate; Ergebnis: ab 2020 1/3 Krane mit Stufe V und 0 Stufe IV; ab 2021 2/3 mit Stufe V und 0 Stufe IV; ab 2022 alle Stufe V in der EU; Nichtverfügbarkeit und Verkauf 2020 und 2021 nicht umgestellte Krane

*2 **Szenario 3**: AT-Krane Übergangsphase 36 Monate; Umstellungszeitraum 36 Monate; Ergebnis: ab 2020 1/3 Krane mit Stufe V und 2/3 Stufe IV; ab 2021 2/3 mit Stufe V und 1/3 Stufe IV; ab 2022 alle Stufe V in der EU

Literaturverzeichnis

[CEDe-2011] CE Delft; INFRAS; Fraunhofer ISI: External Costs of Transport in Europe - Update Study for 2008. Delft: 2011. URL: http://ecocalc-test.ecotransit.org/CE_Delft_4215_External_Costs_of_Transport_in_Europe_def.pdf Download am 30.10.2014

[COM (2014) 581] Europäische Kommission: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Brüssel, 2014

[DEU-2014] Deutz AG: Technologien. Aufruf am: 10.12.2014. URL: http://www.deutz.de/produkte/technologien.de.html

[EC-2013] Consolidated Version of the DIRECTIVE 97/68/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. (2013)

[EG-2011] Konsolidierte Fassung der RICHTLINIE 97/68/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. (2011)

[EPA-1991] United States Environmental Protection Agency: Nonroad Engine and Vehicle Emission Study – Report. Washington. 1991.

[EN13000:2010] EN13000:2010: Krane – Fahrzeugkrane. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.

[FEM-2014] FEM position paper: Commission Proposal regarding requirements relating to emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Document FEM CLE MC N 0697 Final. Frankfurt, 2014

[Ham-2000] Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, A.; Schriever, U.:Einsatz hochfester Stähle im Mobilkranbau. In: Stahlbau, Jg. 69 (2000), Heft 4, S. 295-305.

[Hel-2009] Helms, H.; Lambrecht, U.; Knörr, W.: Aktualisierung des Modells TREMOD – Mobile Machinery (TREMOD-MM). Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2009.

[Hel-2014a] Helms, H.; Heidt, C.: Schadstoffemissionen und Belastungsbeitrag mobiler Maschinen in Baden-Würtemberg. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2014.

[Hel-2014b] Helms, H.; Heidt, C.: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. 2014.

[Hum-2003] Hummel, H.: Ermüdungsverhalten geschweißter Bauteile aus hochfesten Sonderbaustählen in Mobilkranen, Dissertation, Rheinisch-Westfälische-Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2003.

[JRC-2008] Krasenbrink, A.; Dobranskyte-Niskota, A.: 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC Part II. Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, 2008.

[Kle-2012] Borken-Kleefeld, J.; Ntziachristos, L.: The potential for further controls of emissions from mobile sources in Europe. Forschungsbericht: International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Lab of Applied Thermodynamics and EMISIA, Thessaloniki. 2012. URL: http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/TSAP-TRANSPORT-v2-20121128.pdf Download am 30.10.2014

[Kön-2011] König, H.: Maschinen im Baubetrieb. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

[Lam-2004] Lambrecht, U.; Helms, H.; Kullmer, K.; Knörr, W.:Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs in mobilen geräten und Maschinen. Forschungsbericht: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2004.

[LMB-2014] Liebherr Machines Bulle S.A.: Liebherr Abgasnachbehandlungssysteme für Dieselmotoren (2014) URL: http://www.liebherr.com/CP/de-DE/default_cp.wfw/printTrue/tab-131726?file=%7e%2fCMS%2fdownloads%2fBP_Abgasnachbehandlung_de_web.pdf Download am 14.10.2014

[o.V.-2014] Ohne Verfasser: One lump or two. In: cranes & access, Jg. 16 (2014) Heft 2, S. 17-24

[Qua-2008] Quass, U.; John, A. C.; Beyer, M.; Lindemann, J.; Kuhlbusch, T. A.J.: Ermittlung des Beitrags von Reifen-, Kupplungs-, Brems-, und Fahrbahnabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen. Forschungsbericht: Institut für Umweltanalytik, Universität Duisburg-Essen. 2008.

[Sch-2008] Schäffeler, U.; Keller, M.: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Forschungsbericht: Bundesamt für Umwelt, Bern. 2008.

[Sch-2013] Schilling, T.; Frenkel, A.; Bruns, R.; Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Braun, M.; Linsel, P.; Furmans, K.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln der Intralogistik. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Maschinenelemente und technische Logistik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technischen Universität München, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie. 2013.

[SWD (2014) 281] European Commission: IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Review of Directive 97/68/EC on emissions from engines in non-road mobile machinery in view of establishing a new legislative instrument. Brüssel, 2014

[UNEP-2013] United Nations Environment Programme: Diesel Fuel Sulphur Levels: Global Status. Download: 10.11.2014. URL: http://www.unep.org/transport/pcfv/PDF/Maps_Matrices/world/sulphur/MapWorldSulphur_October2013.pdf

[VDMA-2014] VDMA: Ein Umsatzplus von mindestens fünf Prozent wird erwartet – Geplante Emissionsstufe V ist »äußerst ambitioniert«. In: baumagazin.de. URL: http://www.baumagazin.eu/ein-umsatzplus-von-mindestens-fuenf-prozent-wird-erwartet-geplante-emissionsstufe-v-ist-aeusserst-ambitioniert/ Aufruf am 07.12.2014

[Vol-2010] Volvo Construction Equipment: Senkung der Abgasemissionen - in Richtung “Stufe IIIB/Tier 4 Interim” Abgasnormen für Dieselmotoren in Non-road Applikationen FRAGEN UND ANTWORTEN Stand April 2010. Download: 28.09.2014. URL: http://www.volvoce.com/SiteCollectionDocuments/VCE/Documents%20Global/VCE%20Corporate/QnA%20Stage%20IIIB%20Tier%204%20Interim%20BAUMA%20version_DE.pdf

[2007/46/EC] EG-Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge: Richtlinie 2007/46/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für On-Road und Off-Road in der EU [Bild: VDMA, Liebherr, MAN] 1

Abbildung 2-1: Fahrzeugkrane unterteilt in straßenzulässige All-Terrain Krane, geländegängige Rough-Terrain Krane und Raupenkrane..... 6

Abbildung 2-2: Emissionsgrenzwerte der eingeführten Stufe in die EU [Vol-2010]..... 7

Abbildung 2-3: Einführung der Emissionsstufen nach Motorleistungsklassen in der EU [Vol-2010]..... 8

Abbildung 2-4: Vorschlag zur Einführung der Emissionsstufe V für Motoren der Leistungsklasse 130-560 kW in der EU..... 9

Abbildung 2-5: Restriktionen des AT-Krans auf Grund der Straßenzulassung 10

Abbildung 2-6: Weltweite Abgasemissionsregulierung 2014 12

Abbildung 2-7: Globale Stufen für schwefelarmen Dieselkraftstoff 10/2013 [UNEP-2013]..... 13

Abbildung 2-8: All-Terrain-Kran in Fahrstellung 14

Abbildung 2-9: Komponenten und Aufbau eines All-Terrain-Krans 15

Abbildung 2-10: Hubaufgaben und Einsatzgebiete von All-Terrain Kranen..... 16

Abbildung 3-1: Vorgehen zum Ableiten der Basisemissionsfaktoren für AT-Krane 19

Abbildung 4-1: Entwicklung Stickoxidemissionen (Basis: Stufe IV) von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union..... 23

Abbildung 4-2: Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Stickoxidemissionen in der Europäischen Union von AT-Kranen für das Jahr 2014 25

Abbildung 4-3: Entwicklung Partikelemissionen (Basis: Stufe IV) von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union..... 26

Abbildung 4-4: Vergleich eines abgefahrenen mit einem neuen Reifen für All-Terrain-Krane..... 28

Abbildung 4-5: Beitrag der einzelnen Bestandsjahrgänge zu den Partikelemissionen in der Europäischen Union von AT-Kranen für das Jahr 2014..... 30

Abbildung 5-1: Änderungen am Oberwagen auf Grund von Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung, ausgehend von der Stufe III A auf III B und von III B auf IV..... 32

Abbildung 5-2: Änderungen am Unterwagen auf Grund von Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung, ausgehend von der Stufe III A auf III B und von III B auf IV 32

Abbildung 5-3: Zeitlicher Verlauf der Umstellungsphasen von AT-Kranen..... 35

Abbildung 5-4: Ökonomische Auswirkungen für Fahrzeugkran-Branche auf Grund Umstellungen des AT-Krans auf neue Abgasstufe..... 38

Abbildung 5-5: Vom globalen Motor zur komplexen Steuerung und Lagerung von unterschiedlichen Motoren ab 2010..... 39

Abbildung 6-1: Aufbau Oberwagen der Emissionsstufe IV als Ausgangssituation..... 42

Abbildung 6-2: Einbauuntersuchung für das Abgasnachbehandlungssystem der Stufe V 43

Abbildung 6-3: Einbausituation des AGN der Stufe V auf dem Oberwagen..... 43

Abbildung 6-4: Vergleich der Motor- Einbausituation der Stufe IV (links) und Stufe V (rechts) im Unterwagen eines AT-Krans 44

Abbildung 6-5: Einbausituation des AGN der Stufe IV im Unterwagen 45

Abbildung 6-6: Vergleich zwischen dem AGN der Stufe IV und der Stufe V für den Einbau im Unterwagen..... 46

Abbildung 6-7: Aufbau Unterwagen der Emissionsstufe IV als Ausgangssituation..... 46

Abbildung 6-8: Zeitlicher Ablauf Szenario 1 50

Abbildung 6-9: Zeitlicher Ablauf Szenario 2 51

Abbildung 6-10: Zeitlicher Ablauf Szenario 3 52

Abbildung 6-11: Zeitlicher Ablauf Szenario 4 53

Abbildung 6-12: Vergleich der Altersstruktur von Szenario 3 und Szenario 4 im Jahr 2025 54

Abbildung 6-13: Entwicklung der Stickoxidemissionen im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 in der Europäischen Union..... 55

Abbildung 6-14: Entwicklung der Partikelemissionen im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 in der Europäischen Union..... 56

Abbildung A-1: Gittermast-Raupenkran bei Probehüben auf dem Testgelände. A-2

Abbildung A-2: Geländekran in Arbeitsstellung A-3

Abbildung A-3: Autokran auf einem LKW-Fahrgestell.....A-4

Abbildung A-4: All-Terrain-Kran in Arbeitsstellung A-5

Abbildung B-1: Aufbau des Unterwagens eines All-Terrain-Krans B-1
Abbildung B-2: Aufbau des Oberwagens eines All-Terrain-Krans mit zwei Motoren B-3
Abbildung C-1: SCR-System zur Abgasnachbehandlung für Motoren der Stufe IV für Mobil- und Raupenkrane [LMB-2014] C-2
Abbildung C-2: Ansicht Oberwagen AT-Kran, 5 Achsen, Traglast 200 Tonnen, 72 m langer Teleskopausleger mit bis zu 36 m langer Klappspitze C-3
Abbildung C-3: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIA zum Einbau im AT-Kran Oberwagen C-4
Abbildung C-4: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIB zum Einbau im AT-Kran Oberwagen C-5
Abbildung C-5: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Oberwagen C-6
Abbildung C-6: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III A C-7
Abbildung C-7: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III B C-8
Abbildung C-8: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV C-9
Abbildung C-9: Ansicht Unterwagen AT-Kran, 4 Achsen, Traglast 100 Tonnen C-10
Abbildung C-10: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIA zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen C-11
Abbildung C-11: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIB zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen C-12
Abbildung C-12: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen C-13
Abbildung C-13: Motoreinbau im Unterwagenrahmen eines 4-Achsen AT-Kran C-14
Abbildung C-14: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III A C-15
Abbildung C-15: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III B C-16
Abbildung C-16: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV C-17
Abbildung C-17: Ansicht AT-Kran, 5 Achsen, Traglast 220 Tonnen C-18
Abbildung C-18: Vergleich Motorbauart und Bauraum der Stufe III A/B und der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Unterwagen C-19
Abbildung C-19: Änderungen am AT-Kran wegen motorbedingten Anpassungen im Unterwagen der Stufe III B im Vergleich zur Stufe III A C-20

Abbildung D-1: Vorgehen zum Ableiten der Basisemissionsfaktoren für AT-Krane D-2
Abbildung D-2: Altersstruktur für All-Terrain-Krane in der Europäischen Union D-5
Abbildung D-3: Bestandsstuktur von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union D-6
Abbildung D-4: Verschlechterungsfaktor für Partikelemissionen für die Stufen vor IIIA D-9

Bildnachweis

Alle Bilderrechte liegen, sofern sie nicht anders gekennzeichnet sind, bei den vier beteiligten Unternehmen der FEM. Alle Abbildungen wurden, sofern sie nicht anders gekennzeichnet sind, von den Autoren selbst erstellt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Vergleich der Stickoxidemissionen von All-Terrain-Kranen mit mobilen Maschinen 24

Tabelle 4-2: Vergleich der Partikelemissionen von All-Terrain-Kranen mit mobilen Maschinen 27

Tabelle 4-3: Berechnung der verbrennungsmotorisch generierten Partikelemissionen je gefahrenem Kilometer 28

Tabelle 4-4: Berechnung der reifenverschleißbedingten Feinstaubemissionen je gefahrenem Kilometer eines AT-Krans 29

Tabelle 6-1: Kosten-Nutzen Verhältnis der erstellten Szenarien für die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte für AT-Krane mit Betrachtung der Kosten für Motoren- und Fahrzeugkranhersteller . 58

Tabelle 6-2: Kosten-Nutzen Verhältnis der erstellten Szenarien für die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte für AT-Krane mit Betrachtung der Kosten nur für Fahrzeugkranhersteller 59

Tabelle D-1: Basisdaten für das Emissionsinventar D-3

Tabelle D-2: Basisemissionsfaktoren für das Emissionsinventar D-8

Tabelle D-3: Transiente Anpassungsfaktoren für das Emissionsinventar D-10

Anhang A Technische Ausführung zur Klassifikation von Fahrzeugkranen

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Beschreibungen richten sich im Wesentlichen nach den Ausführungen in [Hum-2003] und [Kön-2011].

Die Verbindung zwischen Unter- und Oberwagen eines Fahrzeugkrans wird mithilfe eines Drehkranzes realisiert, der die Kräfte und Momente aus dem Oberwagen in den Unterwagen überträgt. Die erforderliche Leistung für den Fahr- und den Kranantrieb wird bis heute dieselmotorisch zur Verfügung gestellt, da sich nur so die hohen Anforderungen an die Mobilität der Maschinen bewerkstelligen lassen. Der Antrieb der Kranfunktion erfolgt i. d. R. dieselhydraulisch, die Leistung für den Fahrantrieb des Krans wird mit Ausnahme des Raupenkrans mit einem mechanischen Getriebe zu den Achsen übertragen. Der Oberwagen eines Fahrzeugkrans kann frei drehbar, begrenzt drehbar oder auch nicht drehbar sein. Er ist in der Regel mit einem oder mehreren Hubwerken und / oder mit Hydraulikzylindern zum Heben und Senken des Auslegers und der Last ausgerüstet. Als Auslegersysteme kommen entweder Teleskopausleger, die mit unterschiedlichen Auslegerverlängerungen oder Spitzen erweitert werden können, oder Gittermastausleger zum Einsatz. Die am Auslegerkopf hängenden Lasten können mit einer Unterflasche oder mit anderen Lastaufnahmemitteln für Sonderzwecke gehandhabt werden. [EN13000:2010]

Als grundlegende Anforderungen an einen Fahrzeugkran sind nach [Ham-2000] die folgenden Aspekte zu sehen:

- Hohe Tragfähigkeit und ein großer Arbeitsbereich
- Große Mobilität bei einem geringen Konstruktionseigengewicht
- Optimiertes Preis- /Leistungsverhältnis

Die Tragfähigkeiten liegen heute bis über 3.000t und die erreichbaren Auslegerlängen bei über 200m, wobei die größten Tragfähigkeiten nur in geringem Abstand zur Drehkranzmitte erreicht werden.

Raupenkrane

Raupenkrane erreichen innerhalb der Produktkategorie Fahrzeugkrane die höchsten Traglasten und größten Arbeitsbereiche und werden insbesondere für Schwerlasthübe beim Bau von Kraftwerken, Raffinerieanlagen oder zum Errichten von Windenergieanlagen eingesetzt. Abbildung A-1 zeigt einen Raupenkran bei Probehüben auf dem Testgelände.

Abbildung A-1: Gittermast-Raupenkran bei Probehüben auf dem Testgelände

Raupenkrane besitzen ein Raupenfahrwerk, welches es ermöglicht, in aufgerüstetem Zustand mit Last am Einsatzort zu verfahren. Für den Transport zwischen den einzelnen Einsatzorten muss der Kran in kleinere Module zerlegt werden können, da die Gesamtmasse und die Abmessungen des Krans einen Transport auf öffentlichen Straßen sonst nicht zulassen. An der Einsatzstelle muss der Kran mithilfe eines anderen Krans erst aufgebaut bzw. gerüstet werden, um die Hubaufgaben erledigen zu können. Als Auslegersysteme kommen bei Raupenkranen sowohl Gittermast- als auch Teleskopauslegersysteme zum Einsatz. Raupenkrane sind in Abhängigkeit der jeweiligen Hubaufgabe in sehr vielen unterschiedlichen Rüstzuständen hinsichtlich Ausleger- und Ballastkonfigurationen einsetzbar. Die Bedienung des Krans und des Fahrantriebs erfolgen aus der Oberwagenkabine, eine separate Kabine für den Unterwagen existiert nicht.

Geländekrane

Der Geländekran (Rough-Terrain Kran) ist eine Fahrzeugkranbauform, die speziell auf den Einsatz in schwerem Gelände auf Baustellen zugeschnitten ist. In Abbildung A-2 ist ein solcher Geländekran in Arbeitsstellung dargestellt.

Abbildung A-2: Geländekran in Arbeitsstellung

Geländekrane besitzen i. d. R. nur zwei Achsen mit sehr großen Reifen, wodurch sehr gute Fahreigenschaften in schwerem Gelände erreicht werden. Allerdings werden dadurch die für eine Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr zulässigen Achslasten und Abmessungen deutlich überschritten, weshalb diese Krane mit Tiefladern zu den einzelnen Einsatzorten transportiert werden müssen. Für diese Transporte gelten ebenfalls die dargestellten Restriktionen hinsichtlich Abmessungen und Achslasten. Ähnlich dem Raupenkran erfolgt die Bedienung der Fahr- und Kranfunktionen nur aus der Oberwagenkabine, eine Unterwagenkabine wird bei diesen Kranen nicht verbaut.

Autokrane

Bei Autokranen bzw. Straßenkranen wird der Oberwagen des Krans auf einem handelsüblichen Lkw-Fahrgestell aufgebaut. Abbildung A-3 zeigt einen Autokran mit 65t Tragfähigkeit auf einem vier-achsigen LKW.

Abbildung A-3: Autokran auf einem Lkw-Fahrgestell

Der Oberwagen von Autokranen entspricht in seinem Aufbau, dem Oberwagen eines All-Terrain-Krans. Da der Rahmen eines Lkw nicht in der Lage ist die Belastungen aus dem Kranbetrieb aufzunehmen, wird der Oberwagen beim Autokran mithilfe eines Zwischenrahmens, der auch die Klapp- bzw. Schiebeholme für die Abstützung aufnimmt, auf dem Lkw-Rahmen befestigt. Wegen der Verwendung eines serienmäßigen Lkw-Fahrgestells zeichnen sich diese Krane durch günstige Betriebskosten aus, sind aber vor allem beim Einsatz im Gelände einem All-Terrain-Kran deutlich unterlegen. Zudem ist die Krangröße, für die ein Lkw-Fahrgestell als Unterwagen in Frage kommt, auf ca. 60t bis 70t maximaler Tragfähigkeit begrenzt, da größere Krane mehr als die bei serienmäßigen Lkw-Fahrgestellen üblichen vier Achsen benötigen.

All-Terrain-Krane

Der All-Terrain-Kran (AT-Kran) ist der in der Europäischen Union bei weitem am häufigsten verkaufte Fahrzeugkrantyp. Die Einteilung bzw. die Klassifizierung dieser Krane wird im Wesentlichen nach der maximalen Tragfähigkeit vorgenommen, wobei für die einsatzspezifische Auswahl eines Krans weitere Faktoren eine wichtige Rolle spielen. Der Bezeichnung entsprechend kann dieser Kran sowohl im Gelände als auch auf öffentlichen Straßen bewegt werden. Abbildung A-4 zeigt zwei AT-Krane beim Hub von Betonfertigteilen.

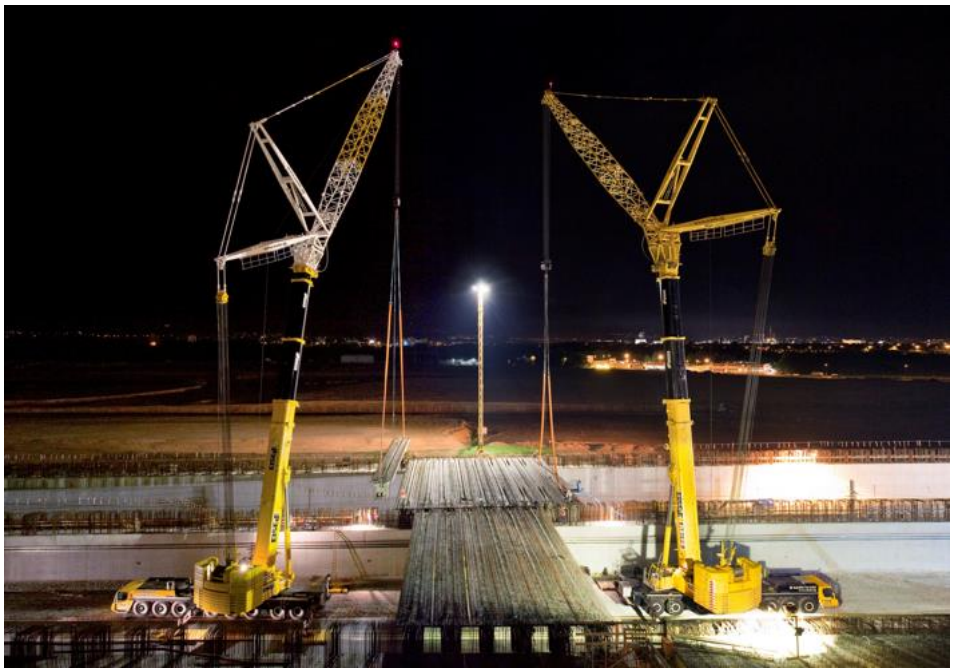

Abbildung A-4: All-Terrain-Kran in Arbeitsstellung

Kleine AT-Krane, bis zu einer Tragfähigkeit von ca. 50 t, können vielfach mit ihrer gesamten Ausrüstung von einem Einsatzort zum nächsten verfahren werden, wohingegen bei größeren Geräten ein Teil der Ausrüstung wie etwa Ballast, Auslegerverlängerungen, der Teleskopausleger selbst oder die Abstützungen mit Tiefladern separat zu jeder Einsatzstelle transportiert werden müssen. Hintergrund hierfür ist die Beschränkung der Achslasten und Fahrzeugabmessungen zur Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr.

Anhang B Technische Beschreibung zum Aufbau des Unter- und Oberwagens von All-Terrain Kranen

Prinzipieller Aufbau Unterwagen

Abbildung B-1- zeigt die Komponenten und den Aufbau des Unterwagens eines vier-achsigen AT-Krans.

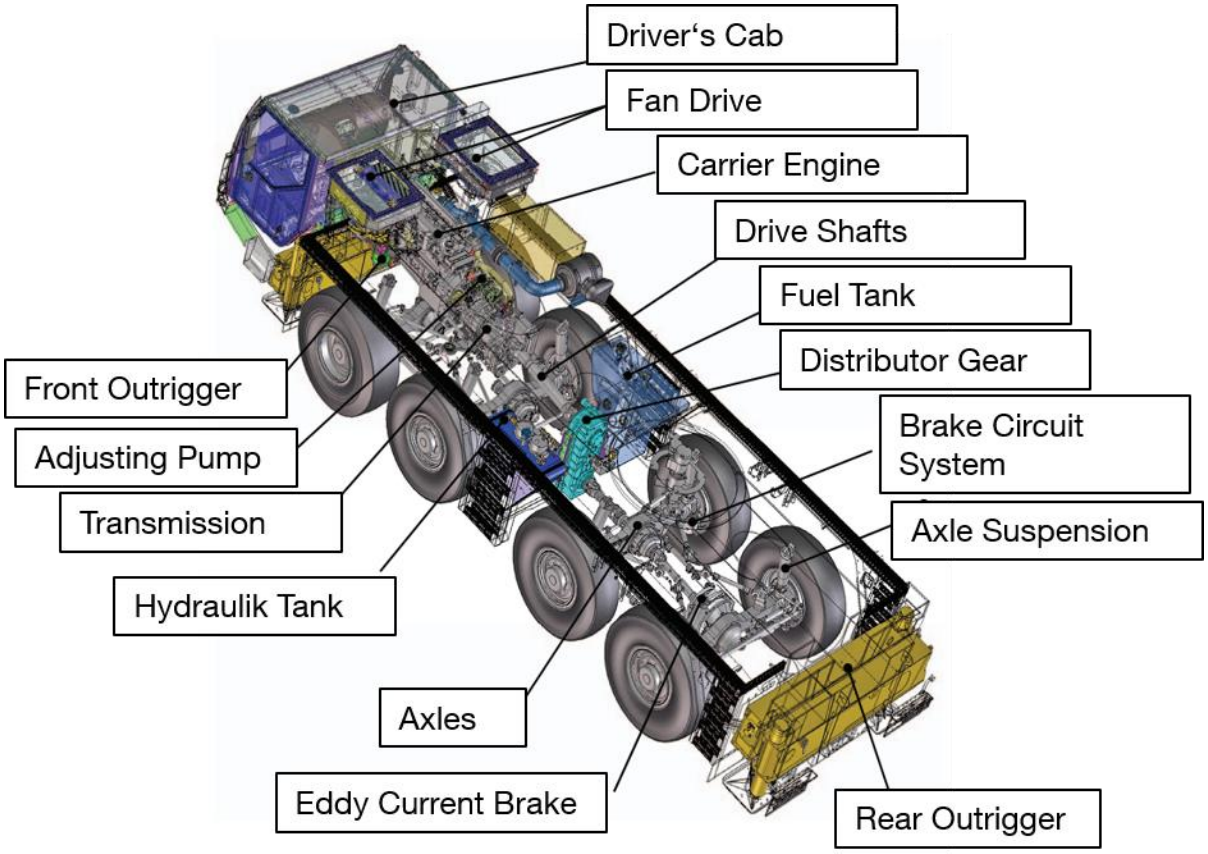

Abbildung B-1: Aufbau des Unterwagens eines All-Terrain-Krans

Die Struktur des Unterwagens besteht aus einer geschweißten Rahmenkonstruktion aus hochfesten Feinkornbaustählen, die für die benötigte Festigkeit und Steifigkeit für den Kran- und Fahrbetrieb notwendig ist. Vorne ist an diesem Rahmen die Fahrerkabine angebracht, aus der der Fahrantrieb des Krans bedient wird. Die Ausstattung der Kabine hinsichtlich Komfort und Ergonomie orientiert sich dabei mittlerweile sehr stark am Nutzfahrzeugsegment. Mittig hinter der Fahrerkabine wird der Unterwagenmotor in einen Rahmenausschnitt eingesetzt. Links und rechts vom Motor befinden sich das Kühlsystem und bei neueren Geräten auch Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems. Der Motor gibt seine Leistung über ein automatisiertes Getriebe, das direkt am Motor angeflanscht ist und Gelenkwellen an die An-

triebsachsen ab. Die hohe Anzahl an Fahrstufen von 12 oder 16 in modernen Getrieben sorgt für einen günstigen Kraftstoffverbrauch. Bei AT-Kranen sind meist mehrere Achsen angetrieben, um auch im Gelände eine gute Manövrierfähigkeit sicherzustellen. Durch Längs- und Quersperren im Antriebsstrang wird dieser Anforderung ebenfalls Rechnung getragen. Da ein AT-Kran im Vergleich zu anderen Fahrzeugen sehr große Abmessungen aufweist, sind bei den meisten Modellen alle Achsen lenkbar, um auch bei beengten Platzverhältnissen, wie sie beispielsweise in Innenstädten auftreten können, eine ausreichende Wendigkeit zu gewährleisten. Mithilfe des Luftfederungssystems sind die Achsen einzeln liftbar. Neben der Betriebsbremse, die als Druckluftbremse ausgeführt ist, besitzen die meisten AT-Krane aufgrund ihrer hohen Masse auch ein verschleißfreies Dauerbremssystem (Wirbelstrombremse oder hydrodynamischer Retarder), welches auf eine der Gelenkwellen wirkt und die Betriebsbremse unterstützt. Zwischen den Achsen ist im Unterwagen der Kraftstofftank, ein Öltank für die Versorgung des Hydrauliksystems im Unterwagen und auch der AdBlue-Tank angebracht. An den Rahmenenden sind bei kleinen und mittelgroßen Kranen die Schiebeholmkästen zur Aufnahme der Abstützungen integriert, Großgeräte besitzen demgegenüber Klappholme als Abstützung, die direkt unterhalb des Drehkranzes angeordnet sind. Der Drehkranz stellt die Verbindung zum Oberwagen her und leitet die auftretenden Kräfte und Momente aus dem Kranbetrieb in die Unterwagenstruktur ein.

Oberwagen / Drehbühne

In Abbildung B-2 ist der schematische Aufbau des Oberwagens / der Drehbühne eines Zwei-Motoren-Krans mit den wichtigsten Komponenten dargestellt. Der Oberwagen ist über den Drehkranz mit dem Unterwagen verbunden. Die tragende Struktur des Oberwagens besteht ähnlich dem Unterwagen aus einem geschweißten Rahmen aus hochfesten Feinkornbaustählen, an dem alle Komponenten des Oberwagens befestigt sind. All-Terrain-Krane sind i.d.R. mit einem Teleskopausleger ausgeführt, der an der Oberseite am Ende des Oberwagens angelenkt und über einen Hydraulikzylinder ein- und austeleskopierbar ist. Die Wippfunktion für den Ausleger wird ebenfalls mithilfe eines Hydraulikzylinders abgebildet. Als Energiequelle für die Kranfunktionen wird ein Dieselmotor verwendet, der im gewählten Beispiel auf der rechten Seite des Rahmens angebracht ist. Die Ölpumpen zur Erzeugung des Drucks und Volumenstroms sind über ein Verteilergetriebe direkt an den Motor angeschlossen. Die Versorgung der einzelnen Verbraucher erfolgt mithilfe von Schlauchleitungen, die Ansteuerung über Steuerblöcke und Ventile.

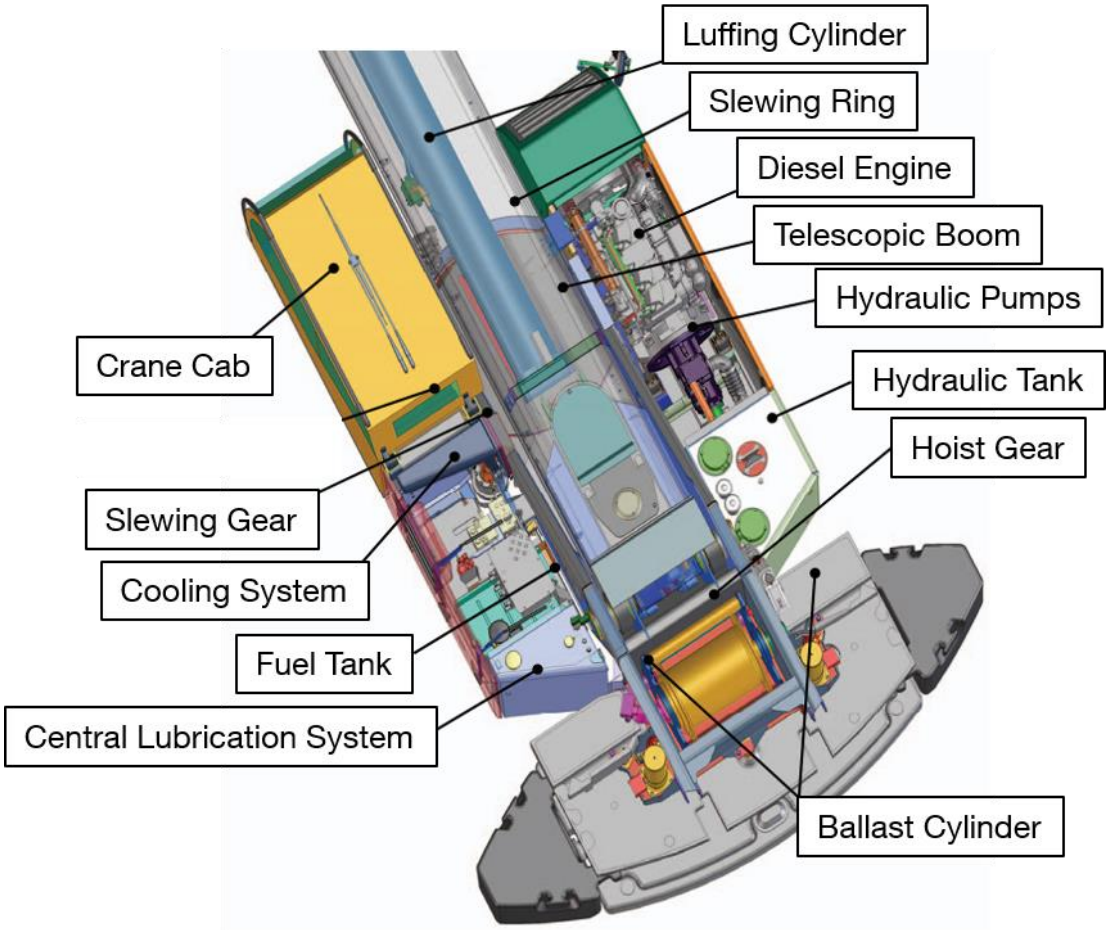

Abbildung B-2: Aufbau des Oberwagens eines All-Terrain-Krans mit zwei Motoren

Hinter dem Motor wird der Öltank zur Versorgung der Hydraulik angebracht. Die Seilwinde und das Drehwerk werden mit je einem Hydraulikmotor angetrieben. Die Ballastierzylinder dienen zur Aufnahme des Gegengewichts, das während der Straßenfahrt auf dem Rahmen des Unterwagens liegt (siehe Abbildung 2-9) oder separat mit einem LKW transportiert werden muss. Auf der linken Seite des Oberwagens sind hinter der Fahrerkabine, aus der die Kranfunktionen bedient werden, das Kühlsystem, der Kraftstofftank für den Oberwagenmotor und die Zentralschmierung untergebracht.

Anhang C Technische Ausführung zur Folgenbewertung der Umstellungen von Stufe III A auf III B und III B auf IV

C.1 Abgasnachbehandlungssysteme

Um die zulässigen Emissionsgrenzwerte ab der Stufe III B einzuhalten, sind spezielle AGN-Systeme erforderlich. Bei mobilen Maschinen und Geräten haben sich ab Einführung der Stufe III B zwei unterschiedliche Herangehensweisen herausgebildet. Einerseits existieren Systeme, die zur Einhaltung der Partikelgrenzwerte einen Dieselpartikelfilter (DPF) und zur Reduzierung von Stickoxidemissionen innermotorische Maßnahmen wie Abgasrückführung einsetzen. Andererseits gibt es Systeme, mit denen sich die Partikelgrenzwerte innermotorisch realisieren lassen und die zulässigen Stickoxidemissionen mithilfe eines SCR-Systems erreicht werden können. Entsprechend der Anwendungen in Fahrzeugkranen und speziell im AT-Kran wird ausschließlich die SCR-Technik sowohl im Oberwagen als auch im Unterwagen zur Abgasnachbehandlung bei der Stufe III B und der Stufe IV eingesetzt. Lösungen ohne SCR aber mit DPF werden in Europa bei den Fahrzeugkranen bis heute nicht eingesetzt. In Abbildung C-1 ist die Funktion des SCR-Systems schematisch für die Stufe IV dargestellt.

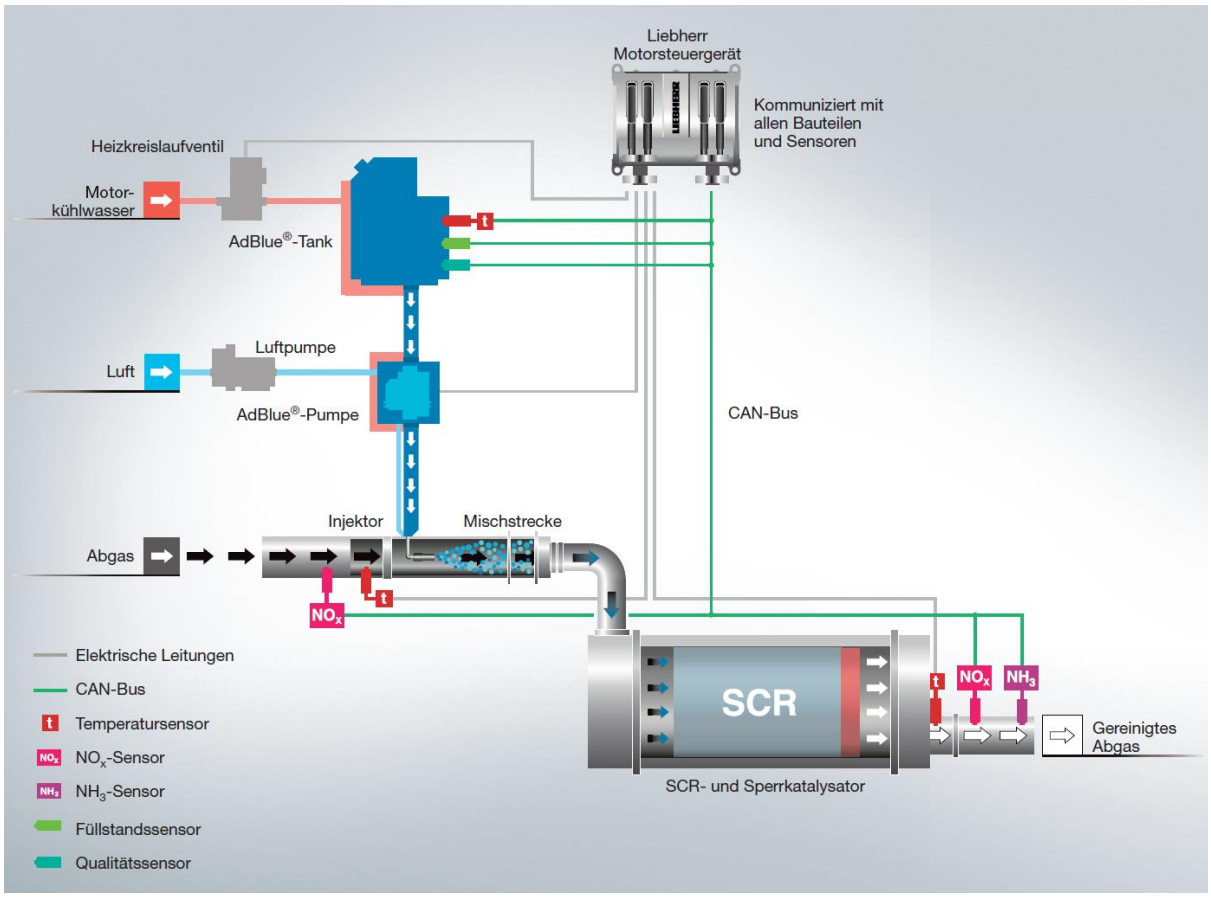

Abbildung C-1: SCR-System zur Abgasnachbehandlung für Motoren der Stufe IV für Mobil- und Raupenkrane [LMB-2014]

Im SCR-Katalysator werden die im Abgas enthaltenen Stickoxide chemisch reduziert. Dafür wird dem Abgas über einen Injektor eine Harnstofflösung (AdBlue) beigemischt. Im Hydrolyse-Katalysator entsteht daraus Ammoniak und CO_2, so dass schließlich die Beschichtung im SCR-Katalysator die Reaktion von Ammoniak und Stickoxiden zu ungiftigem Stickstoff und Wasserdampf bewirkt [LMB-2014].

Mit dem zusätzlichen SCR-Sytem für Stufe III B als auch für Stufe IV kommen mehr Komponenten zum Motor hinzu, die im AT-Kran auch entsprechenden Bauraum benötigen. Der zur Verfügung stehende Einbauraum im AT-Kran ist jedoch auf Grund seiner spezifischen Anforderungen nicht beliebig erweiterbar. Im Folgenden werden diese spezifischen Platz- und Gewichtsprobleme am Beispiel des Oberwagens und an zwei Beispielen des Unterwagens für die Umstellung von AT-Kranen von Stufe III A auf III B und von Stufe III B auf IV exemplarisch aufgezeigt.

C.2 Konstruktive Änderungen am AT-Kran Oberwagen durch neue Motorsysteme der Stufe III B und Stufe IV

In Abbildung C-2 ist beispielhaft ein AT-Kran mit fünf Achsen, auf den sich die vorgestellten Änderungen im Bereich des Oberwagens beziehen, mit seinen Hauptkomponenten dargestellt.

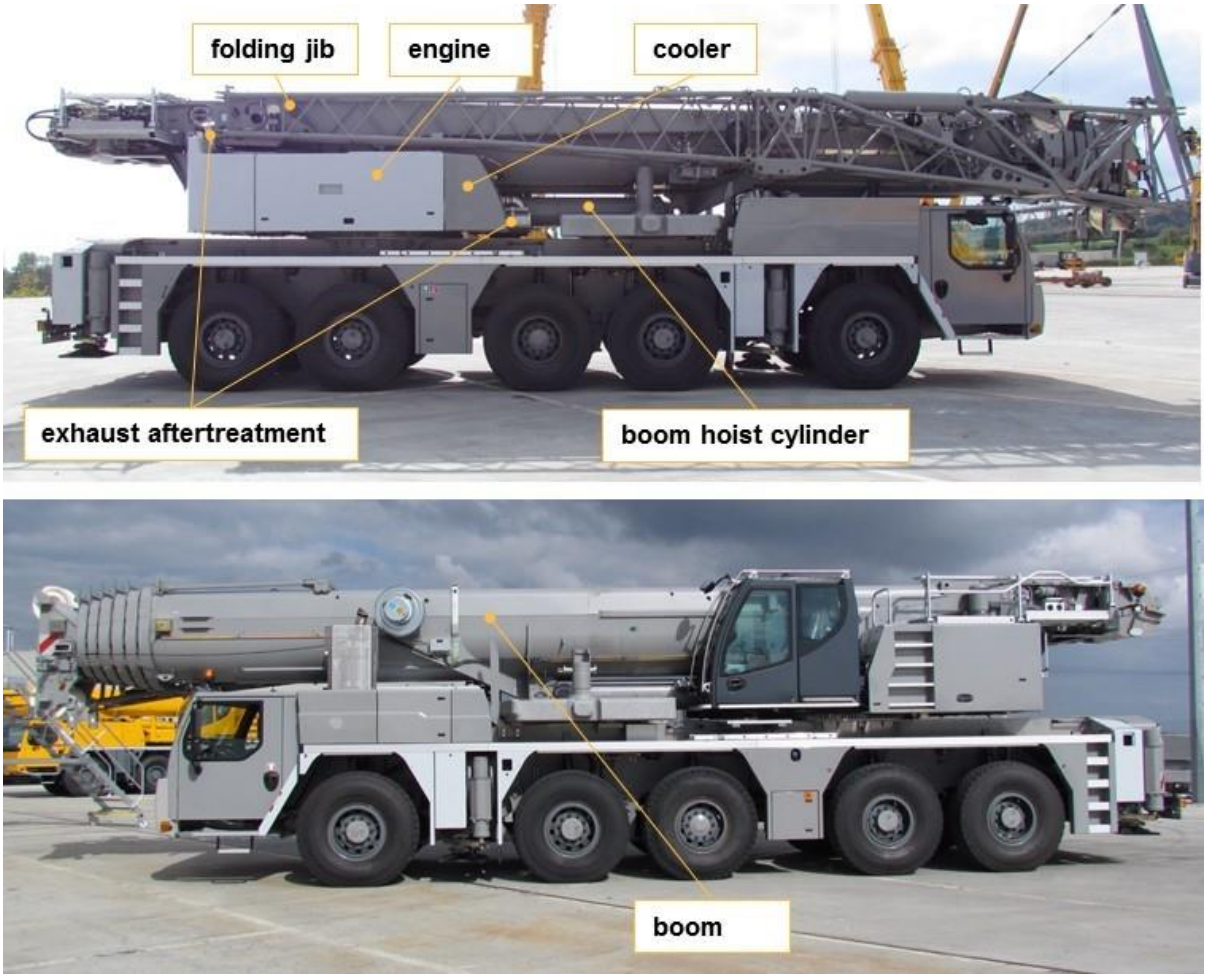

Abbildung C-2: Ansicht Oberwagen AT-Kran, 5 Achsen, Traglast 200 Tonnen, 72 m langer Teleskopausleger mit bis zu 36 m langer Klappspitze

Änderungen des Motorsystems

Der im Oberwagen verbaute Motor der Stufe III A ist in Abbildung C-3 dargestellt. Der Motor ist mit stirnseitig angebundenem Kühler (rechts im Bild) zu sehen. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht aus einem Abgastopf mit Schalldämpfer und Funkenfänger sowie dem Endrohr links und dem zuführenden Rohrwerk rechts vom Topf.

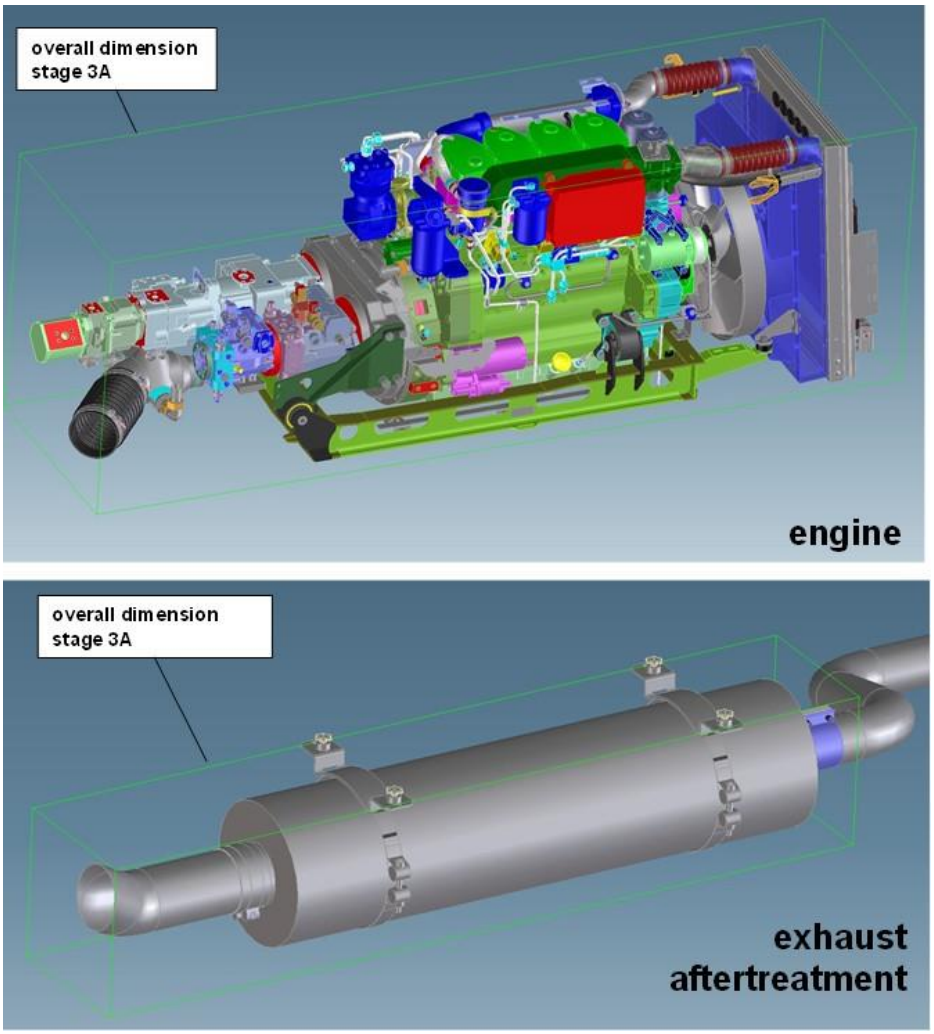

Abbildung C-3: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIA zum Einbau im AT-Kran Oberwagen

Abbildung C-4 zeigt den Motor der Stufe III B sowie das dazugehörige SCR-System, welches zum Einhalten der Grenzwerte notwendig ist. Das Volumen des dargestellten Motors hat sich im Vergleich zum Motor der Stufe III A um 4,6 Prozent erhöht, wobei das Gewicht um 40 kg reduziert wurde. Grundsätzlich ist die abzuführende Wärmemenge der neuen Motoren der Stufe III B gestiegen, so dass ein größerer und im Vergleich zu Stufe III A anders aufgebauter Kühler notwendig wurde. Der neue Kühler wies andere Anschlüsse auf und erforderte eine neue Leitungsführung für Ladeluft und Kühlwasser. Gravierendere Änderungen als beim Motor ergaben sich mit der Einführung der Stufe III B beim AGN, dessen Volumen und Gewicht im Vergleich zu Stufe III A um 232 Prozent und 91 kg zugenommen hat. Ausschlaggebend dafür ist das zusätzliche SCR-System im Abgastopf.

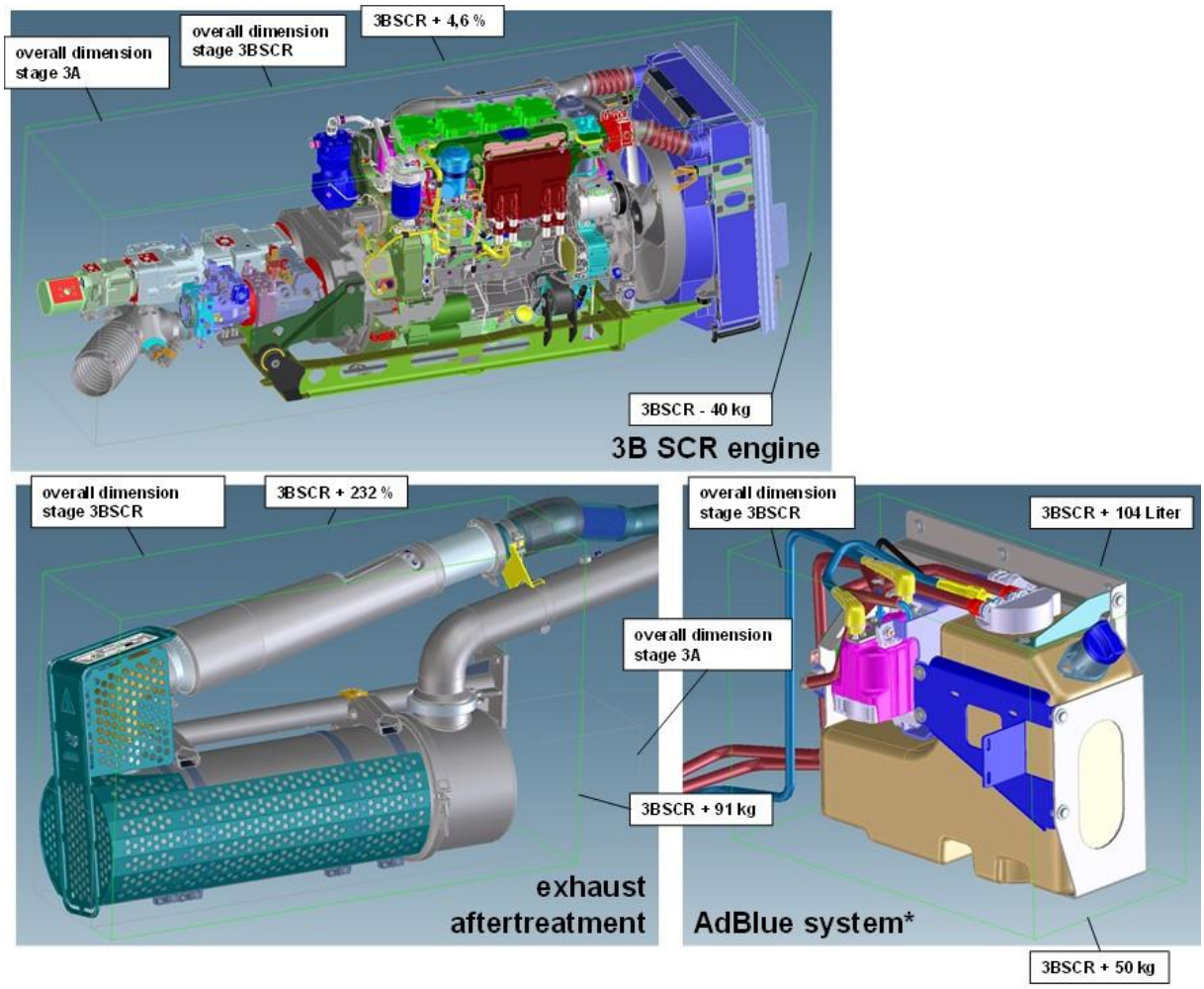

Abbildung C-4: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIB zum Einbau im AT-Kran Oberwagen

Zum SCR-System kommen noch das Pumpenmodul, die Dosiereinheit und der Harnstoff-Tank hinzu. Neben dem zusätzlich notwendigen Bauraum kommen mit dem Harnstoff-Tank im dargestellten Beispiel in Abbildung C-5 50 kg an Masse hinzu. Die Größe des Harnstofftanks ist abhängig von der zu bevorhaltenden Menge an Harnstoff. Entscheidend für den Einbau des Abgasnachbehandlungssystems im Oberwagen sind die einzuhaltenden Mindestabstände und Positionen der einzelnen Komponenten. So muss das Mischrohr ab der Injektion des Harnstoffes eine bestimmte Länge aufweisen, um die Funktionsfähigkeit der Abgasnachbehandlung sicher zu stellen.

Zur Erfüllung der Abgasgrenzwerte der Stufe IV wurden am Motor weitere technologische Änderungen vorgenommen. Analog den Motoren der Stufe III B weisen Motoren und das zugehörige Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV geänderte bauliche Abmaße, Änderungen in der Dimensionierung und Positionierung der erforderlichen Nebenaggregate und ein Mehrgewicht auf, was in Abbildung C-5 dargestellt wird.

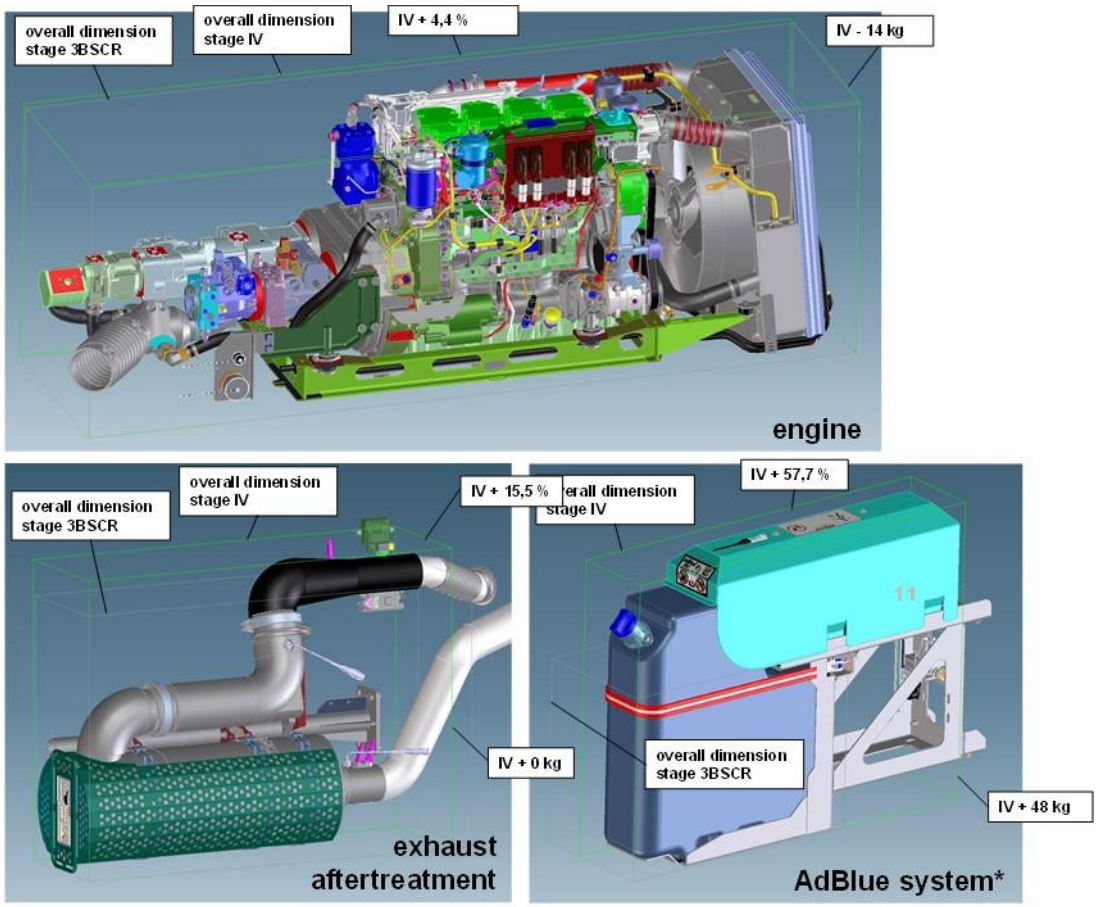

Abbildung C-5: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Oberwagen

Das Volumen des Motors der Stufe IV ist um 4,4 Prozent im Vergleich zum Motor der Stufe III B gestiegen, die Masse um 14 kg gesunken. Das Frontend wurde geändert und die Anschlüsse des Motors neu positioniert. Daraus ergaben sich erneut Änderungen an der Vormontage-Einheit des Motors mit einem neuen Kühler, auf Grund der erneut erhöhten abzuführenden Wärmemenge. So mussten erneut die Ladeluftleitungen und Kühlwasserschläuche geändert sowie die Hydraulik des Lüfterantriebs angepasst werden. Das SCR-System ist im Volumen um 15,5 Prozent gewachsen und stellte mehr Restriktionen für den Einbau dar. So muss beispielsweise die Lage der Sensoren und die Länge des Mischrohrs exakt eingehalten werden. Weiterhin ist der Harnstofftank um 57,7 Prozent im Volumen gewachsen, das ein Mehrgewicht von 45 kg verursachte.

Änderungen am Oberwagen

Die technologischen Weiterentwicklungen des Motors und des AGN der Stufe III B sowie der Stufe IV verursachten maschinenseitig gravierende Änderungen. Ausgangssituation für die umfangreichen konstruktiven Anpassungen am Oberwagen von AT-Kranen ist die Stufe III A. In Abbildung C-6 ist ein Beispiel für die Einbausituation des Dieselmotors und Kühlers sowie des Abgastopfs, bestehend aus Schall-

dämpfer und Funkenfänger, dargestellt. Der Abgastopf ist unter der Absturzvorrichtung angebracht. Die Abgasrohrführung vom Motor zum Abgastopf ist über dem Motor und dem Öltank positioniert.

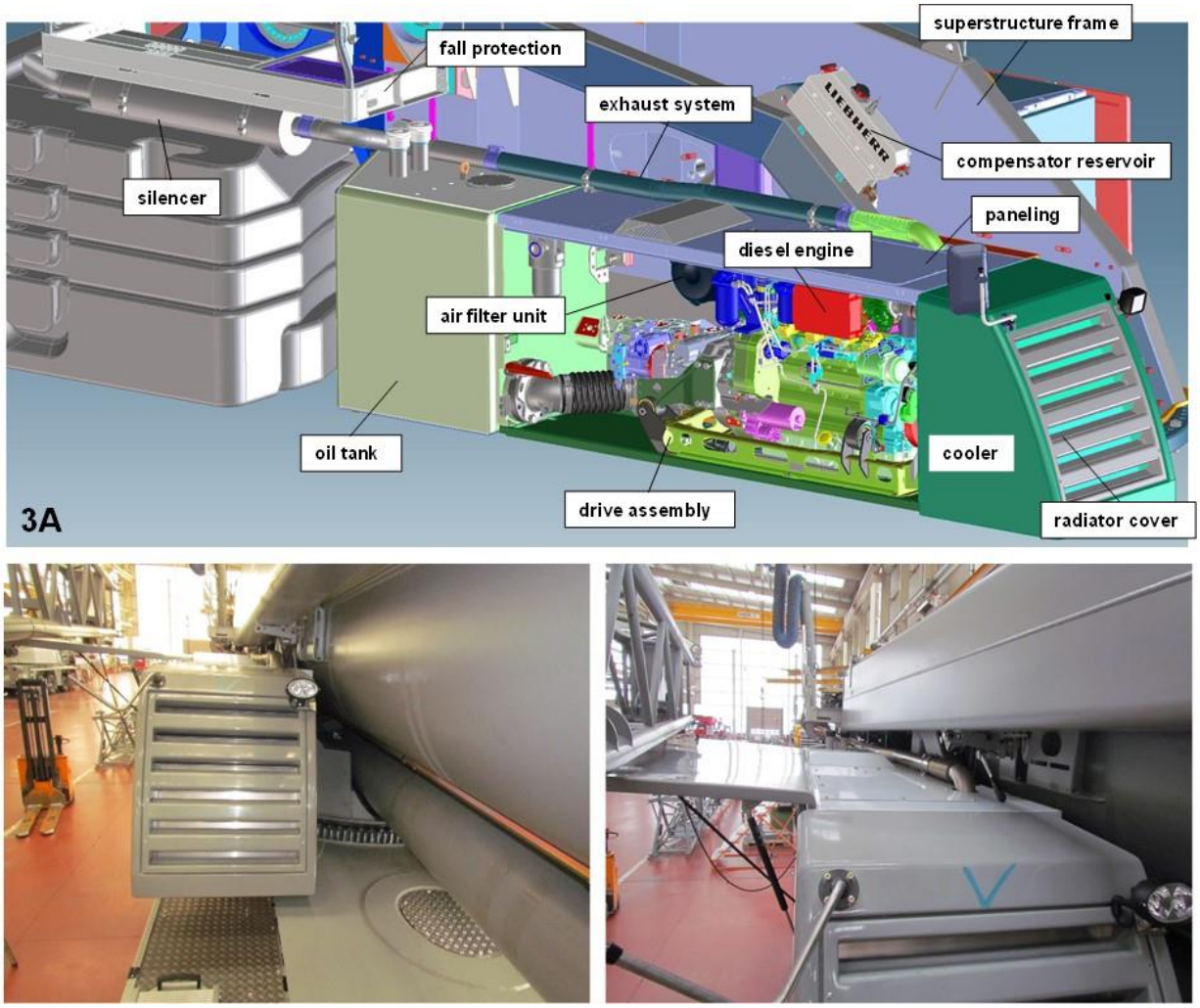

Abbildung C-6: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III A

Im Vergleich zur Stufe III A (siehe Abbildung C-6) ist in Abbildung C-7 die Einbausituation im Oberwagen für den Motor und das Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III B zu sehen. Deutlich zu erkennen ist das neu hinzugekommene SCR-System zwischen Kühler und Wippzylinder. Aus mangelndem Platz am Oberwagen musste diese ungünstige Positionierung jedoch gewählt werden. Da die gereinigten Abgase immer noch nach hinten und wegen vorbeigehender Fußgänger nach oben abgeführt werden müssen, musste ein neues Abgasrohr vom SCR-System über den Öltank und Motor angelegt werden. Dies verursachte wiederum Änderungen an der Motorverkleidung. Wegen einem höheren Abgasgegendruck mussten die Abgasrohre auch im Durchmesser geändert werden und beanspruchten durch den größeren Durchmesser mehr Einbauraum als zuvor. Der für das SCR-System notwendige

Harnstoff wurde in einem Tank auf der gegenüberliegenden Seite hinter der Kranführerkabine untergebracht.

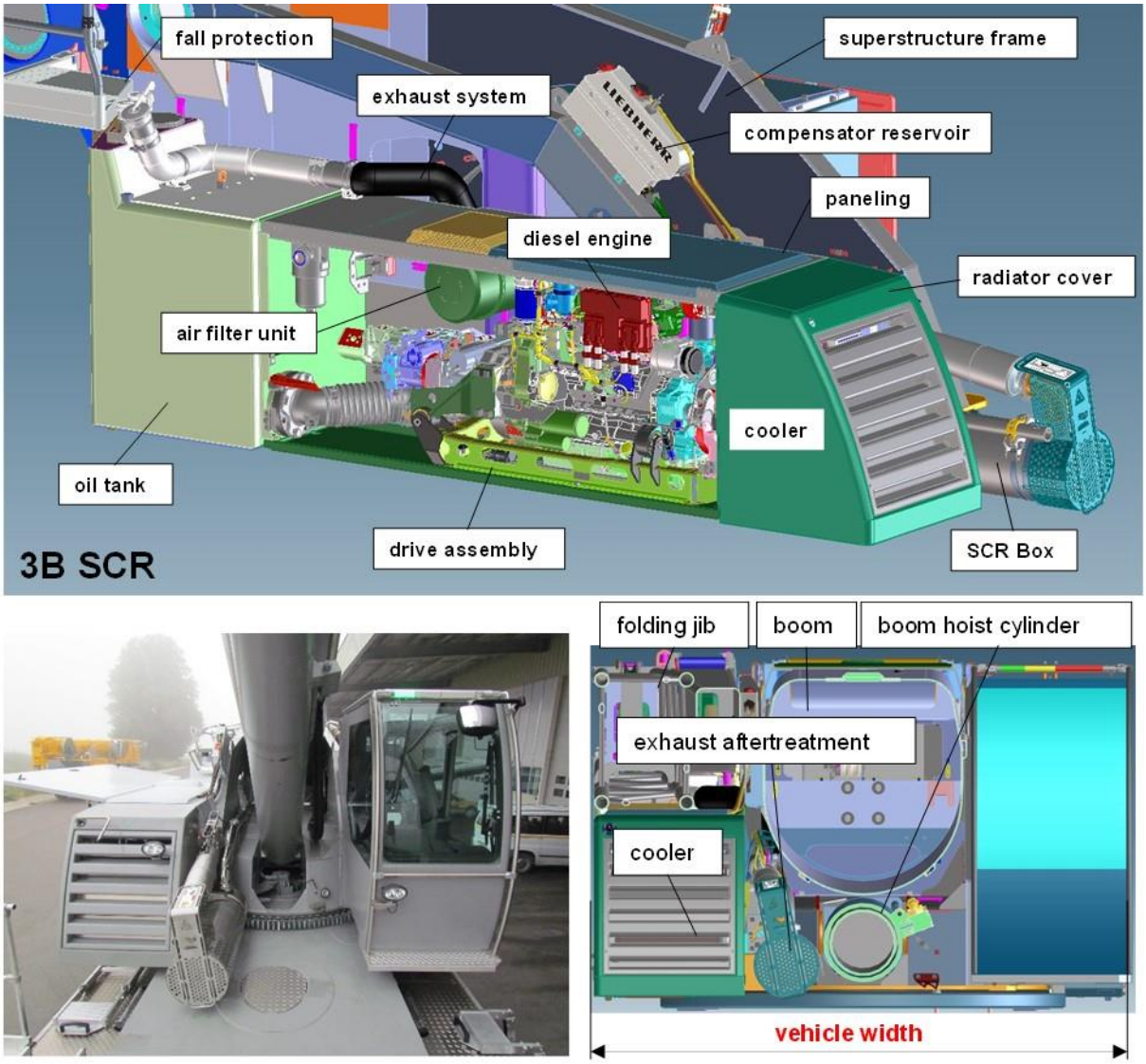

Abbildung C-7: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III B

Bei der Positionierung des Harnstofftanks muss auf die Zugänglichkeit zur Betankung geachtet werden. Die Zugänglichkeit muss zusätzlich bei allen anderen Komponenten für die Wartung sichergestellt sein. Größere Einschränkungen für den Einbau und die Anordnung der Komponenten ergeben sich durch die Einbauvorschriften des Motorenherstellers sowie auf Grund der Bauteiltemperatur, die bei einigen Bauteilen sehr hoch sein kann. Die genannten Aspekte schränken den Lösungsraum zum Einbau der Komponenten am Oberwagen neben dem gestiegenen Platzbedarf erheblich ein. Nach dem Einbau der Komponenten muss darüber hinaus die Auf- und Abstiegsmöglichkeit im Kranbetrieb gewährleistet sein. Ein größerer Turbolader, die neue Lage des Abgas-Anschlusses, eine neue Befestigung des geänderten Öl-

tanks sowie eine neue Halterung für den Abgastopf verursachten darüber hinaus Änderungen am Stahlbau der Drehbühne, so dass eine neue Berechnung der Tragkraft erforderlich wurde. Durch die Änderungen musste zusätzlich die gesamte Verkabelung der Hydraulik und Elektrik neu geplant und ausgeführt werden.

Ähnliche Änderungen brachte auch die Umstellung des AT-Krans im Oberwagen auf Stufe IV mit sich. Im Vergleich zur Stufe III B erforderten das SCR-System und der Harnstofftank mit einem Volumenzuwachs von 15,5 Prozent und 57,7 Prozent wesentlich mehr Einbauraum. Abbildung C-8 stellt die Einbausituation für die Stufe IV im Oberwagen dar.

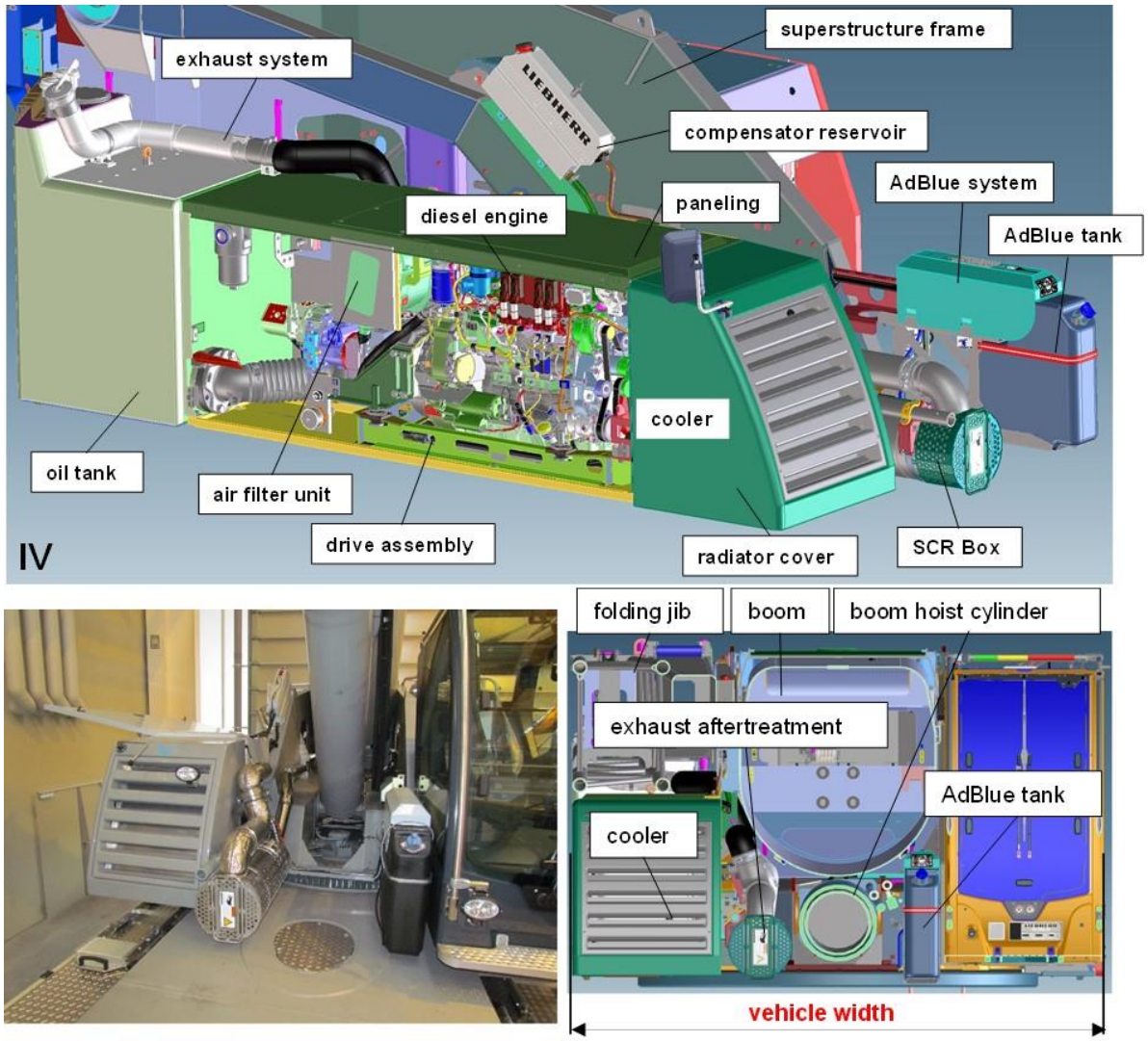

Abbildung C-8: Einbausituation im AT-Kran Oberwagen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV

Der vergrößerte Harnstofftank musste aus Platzgründen rechts neben dem Wippzylinder positioniert werden. Durch die Änderung des Einspritzsystems musste die Hydraulik- und Elektrikinstallation erneut geändert werden. Wegen der neuen Lage des

Klimakompressors im Vergleich zur Stufe III B wurde auch eine neue Motorlagerung erforderlich. Auch verursachten ein geänderter Turbolader sowie ein neu positionierter Abgas-Anschluss mit Abgasklappe wieder Änderungen am Stahlbau der Drehbühne und brachte neue Tragwerksberechnungen mit sich. Sowohl der notwendige Platz als auch das zunehmenden Gewicht der Komponenten zur Abgasnachbehandlung verursachten große Schwierigkeiten bei der Adaption der neuen Abgasstufen im Oberwagen.

C.3 Konstruktive Änderungen am AT-Kran Unterwagen mit vier Achsen durch neue Motorsysteme der Stufe III B und Stufe IV

Abbildung C-9 zeigt beispielhaft einen AT-Kran mit vier Achsen, an dem im Folgenden die Änderungen am Motorsystem sowie die daraus resultierenden konstruktiven Anpassungen am Unterwagen dargestellt werden.

Abbildung C-9: Ansicht Unterwagen AT-Kran, 4 Achsen, Traglast 100 Tonnen

Zu sehen ist auf dem oberen Bild das AGN, das Kühlsystem mit Ladeluftkühler sowie die Position des Harnstofftanks. Auf der gegenüberliegenden Seite ist auf dem unteren Bild der Motor aufgezeigt.

Änderungen des Motorsystems

Der im Unterwagen des in Abbildung C-9 dargestellten AT-Krans verbaute Motor inklusive dem AGN der Stufe III A ist in Abbildung C-10 dargestellt. Die Erreichung der Grenzwerte für Stufe III A wird mit rein innermotorischen Lösungen, wie einer verstärkten Ladeluftkühlung, einer Erhöhung des Einspritzdrucks sowie einen angepassten Förderbeginn, erreicht. Der Abgastopf besteht aus einem Funkenfänger und einem Schalldämpfer.

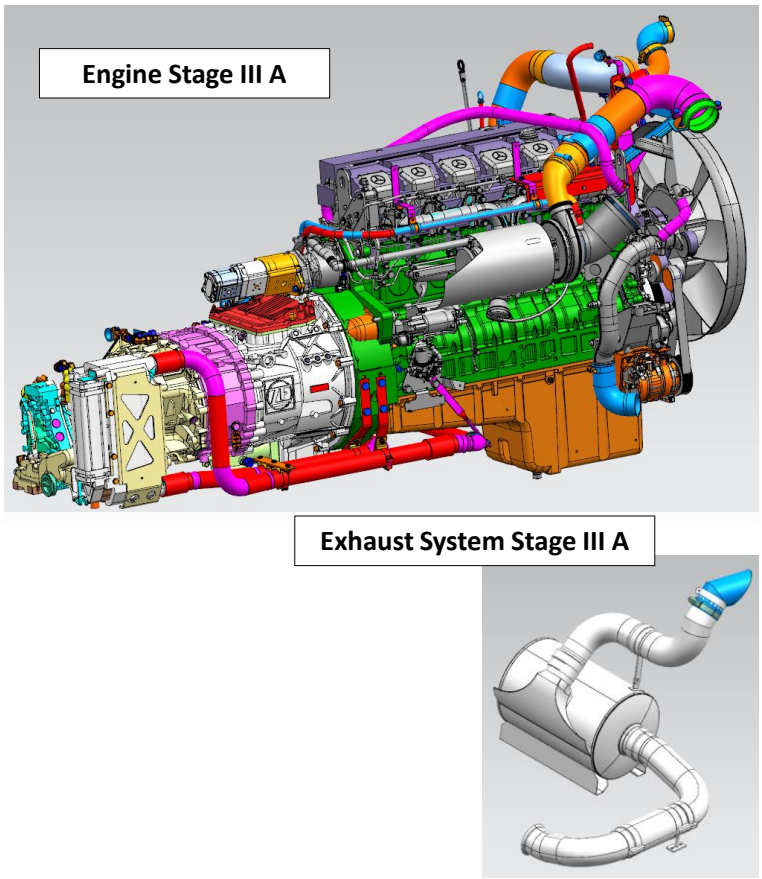

Abbildung C-10: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIA zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen

Analog zum Motor im Oberwagen sind beim Motor für den Unterwagen rein innermotorische Maßnahmen zum Erreichen der geforderten Grenzwerte der Stufe III B nicht mehr ausreichend. Wie in Abbildung C-11 zu sehen, bleibt der Grundmotor der Stufe III B im Vergleich zur Stufe III A (siehe Abbildung C-10) in den Abmessungen gleich, jedoch steigt das Gewicht. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht aus einem Harnstofftank, einem Pumpenmodul, einer angepassten Druckluftanlage, einer Dosiereinheit, dem SCR-Katalysator und einer neuen Abgasverrohrung mit Iso-

lation. Zusätzlich wurde die Kühlanlage angepasst, indem die abzuführende Wärmemenge für Ladeluft und Kühlwasser erhöht wurde. Hinzu kamen zusätzliche Kühlwasseranschlüsse zur Vorwärmung des Harnstofftanks und des Pumpenmoduls.

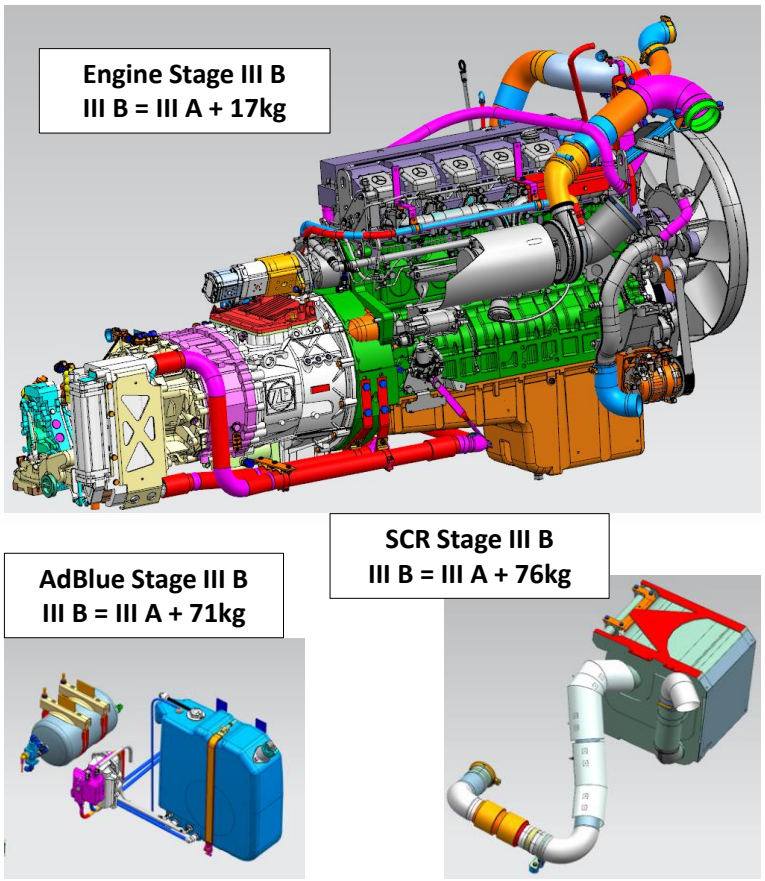

Abbildung C-11: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IIIB zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen

Diese Änderungen am Motorsystem erforderten einen größeren Bauraum für die Motorperipherie. Mit der zusätzlichen Gewichtserhöhung von 164 kg gegenüber der Stufe III A im Unterwagen wurden Anpassungen am gesamten Kran notwendig, um alle Zulassungsvorschriften zu erreichen.

Mit der Stufe IV wurde ein neuer Grundmotor mit geänderten Komponenten für das SCR-System, dargestellt in Abbildung C-12, eingeführt. Auch die Kühlanlage wurde wieder angepasst, weil die abzuführende Wärmemenge für Ladeluft und Kühlwasser erneut erhöht wurde. Gegenüber der Stufe III B erhöhte sich das Gewicht im Unterwagen um weitere 173 kg, so dass erneut Anpassungen am gesamten AT-Kran erforderlich wurden, um die Zulassungsvorschriften einzuhalten.

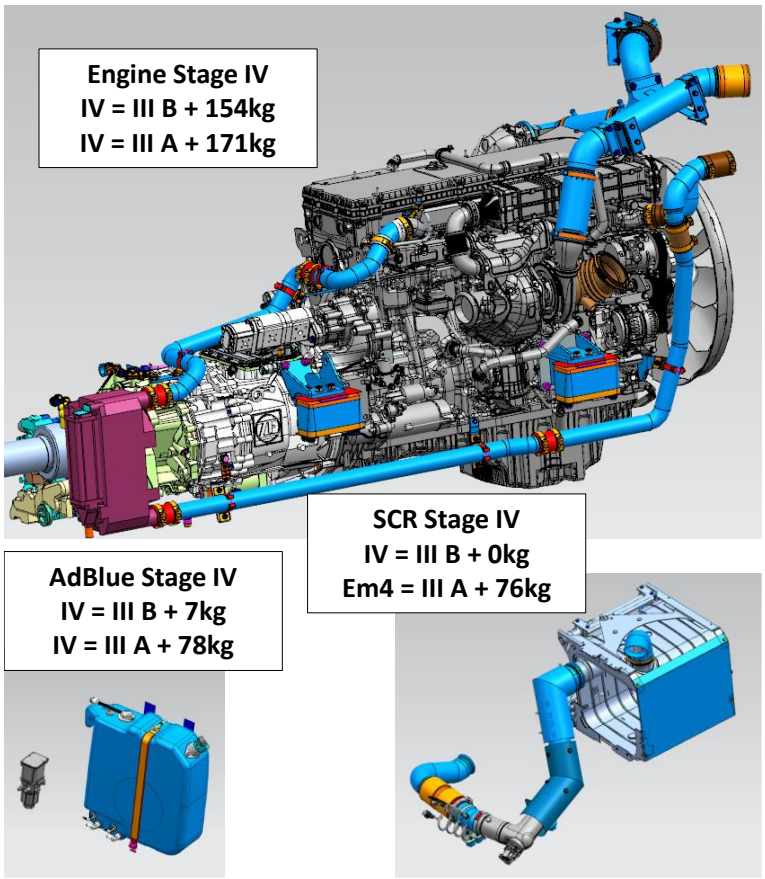

Abbildung C-12: Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen

Änderungen am Unterwagen

Durch die kompakte Bauweise des AT-Krans, ist der Motor bei diesem vierachsigen Mobilkran sehr stark in den Unterwagenrahmen integriert. Die Abbildung C-13 zeigt den typischen Unterwagenrahmen eines solchen Krans. Bei einem vierachsigen Mobilkran wird die Antriebseinheit, bestehend aus Motor, Getriebe, Kühlanlage und Motorperipherie zwischen den Stützen eingebaut. In der Abbildung sind die entsprechenden Befestigungspunkte für die Antriebseinheit und deren Peripherie gekennzeichnet, ebenso der Durchbruch der Abgasverrohrung durch die Seitenwand. Die Abbildung unten zeigt die komplette Antriebseinheit im nun transparent dargestellten Unterwagenrahmen. Meist schon zu Beginn der Montage des Krans wird die vormontierte Motor-Getriebe Einheit in den Rahmen eingebaut.

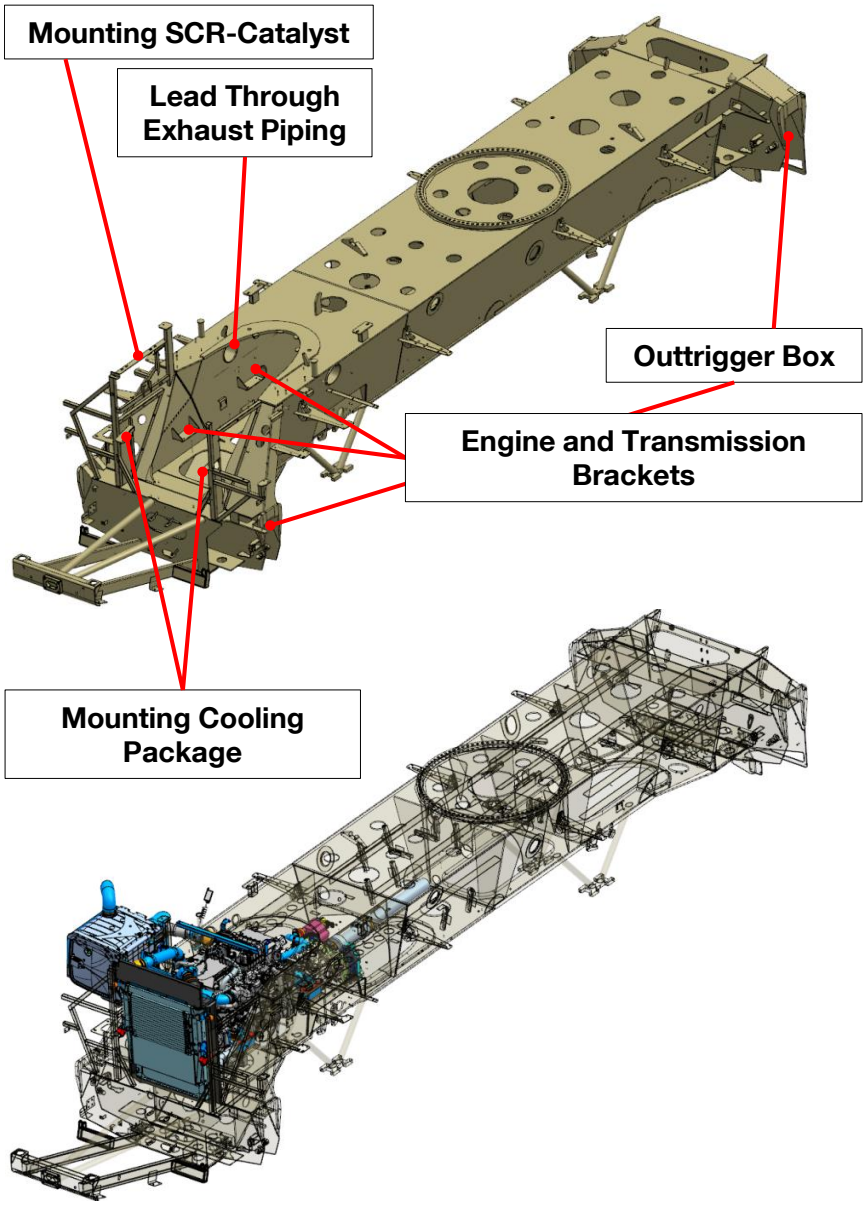

Abbildung C-13: Motoreinbau im Unterwagenrahmen eines 4-Achsen AT-Kran

Danach folgt die Montage der Kühlanlage, bestehend aus Wasserkühler, Ladeluftkühler und Kondensator der Klimaanlage. Der Anbau von Kühlwasserrohren und Ladeluftleitungen ist der nächste Schritt. Abgasanlage und Luftfilter samt Verrohrung folgen erst, wenn der Unterwagen annähernd komplettiert ist. All dies verdeutlicht auch den Umfang der erforderlichen, konstruktiven Änderungen, wenn Bauteile an der Antriebseinheit verändert werden, so wie bei allen Einführungen neuer Abgasrichtlinien bisher geschehen.

In Abbildung C-14 ist die Einbausituation im Unterwagen am AT-Kran mit der Stufe III A dargestellt. Die Abgasanlage, bestehend aus einem Schalldämpfer mit integriertem Funkenfänger ist in Fahrtrichtung rechts auf der Unterwagenverkleidung montiert. Die Kühlanlage, bestehend aus Wasserkühler, Ladeluftkühler und Kondensator

für die Klimaanlage, ist in Fahrtrichtung vor dem Motor angebaut und wird durch einen auf dem vorderen Kurbelwellenende verbauten Viscolüfter versorgt. In Fahrtrichtung links sind neben dem Motor der Hydrauliktank und eine Unterflaschenablage montiert.

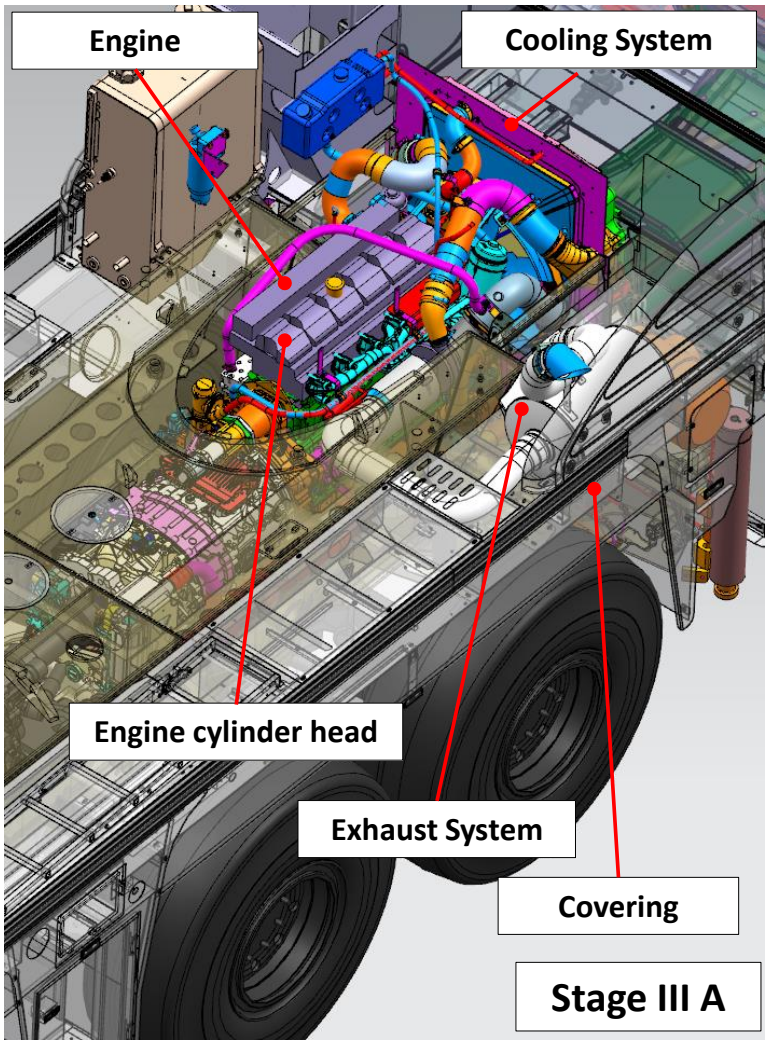

Abbildung C-14: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III A

Direkt hinter dem Zylinderkopf des Motors wird das Gegengewicht des Oberwagens zum Rüsten auf dem Unterwagenrahmen abgelegt. An gleicher Stelle schwenkt dieses im Kranbetrieb beim Drehen des Oberwagens auch vorbei. Somit wird der Einbauraum des Motors nach hinten von dem Gegengewicht, nach vorne von der Unterwagenkabine, zur linken Seite vom Hydrauliktank, der Unterflaschenablage und zur rechten Seite vom Schalldämpfer begrenzt.

Abbildung C-15 zeigt die Einbausituation im Unterwagen des Vierachsers der Stufe III B. Die in Fahrrichtung rechts zuvor angebrachte Abgasnachbehandlung ist durch einen SCR-Katalysator ersetzt worden. Die Verrohrung vom Motor zum SCR-

Katalysator muss eine gute Vermischung des Abgases mit dem eingespritzten Harnstoff sicherstellen und für eine ausreichende Abgastemperatur im SCR-Katalysator sorgen. Die dafür neu entwickelte Abgasverrohrung benötigt eine gerade Mischstrecke und eine bis dahin nicht erforderliche Isolierung.

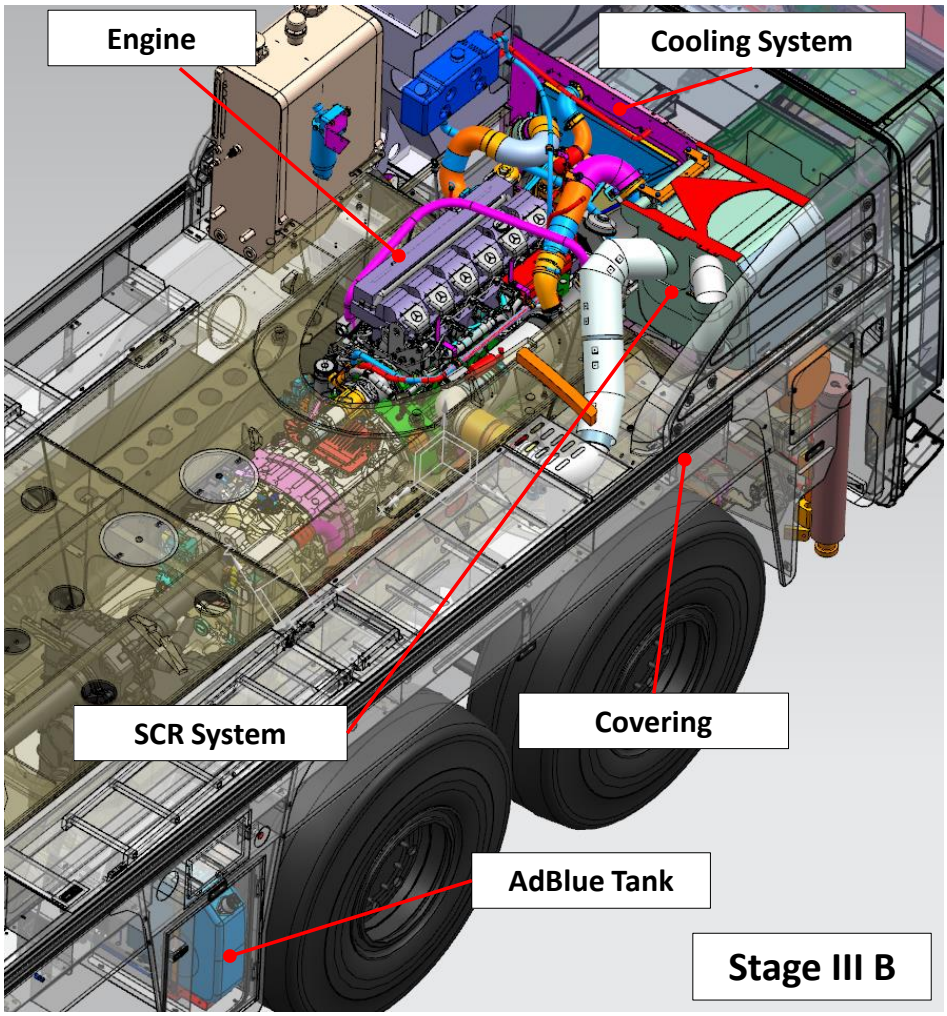

Abbildung C-15: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe III B

Die Motorverkleidung und die Unterwagenverkleidung muss verändert werden, um in dem vorhandenen Bauraum den SCR-Katalysator unterzubringen. Eine Änderung der Stauboxen zwischen Achse zwei und drei stellt den Einbauraum für Harnstofftank und Pumpenmodul des SCR-Systems sicher. Wegen erhöhter Kühlleistungsbedarfe und zusätzlich erforderlicher Wasseranschlüsse zum Vorwärmen des SCR-Systems muss die Kühlanlage umfangreich verändert werden. Auch das Druckluftsystem muss angepasst werden, weil die Einbringung des Harnstoffs in den Abgasstrom mittels Druckluft erfolgt.

All diese Maßnahmen führen im Unterwagen zu einem Mehrgewicht von 164kg. Da auch im Oberwagen durch die erforderlichen Änderungen am Motor ein Mehrge-

wicht von 153 kg generiert wird, muss das in der zulassungsfähigen 12t-Achslast Konfiguration mitzuführende Gegengewicht entsprechend verringert werden. Dies erfordert eine Neuberechnung der Traglasttabellen.

In Abbildung C-16 ist der Motoreinbau der Stufe IV zu sehen. Durch den nun vollständig neuen Grundmotor sind umfangreiche Änderungen nicht nur an der Motorperipherie, sondern auch an der tragenden Struktur des Unterwagenrahmens erforderlich. Da der Motor an einigen Stellen mit dem Rahmen kollidiert, sind hier Änderungen am Rahmen durchzuführen und mittels FEM-Berechnung die Funktion des Tragwerks abzusichern.

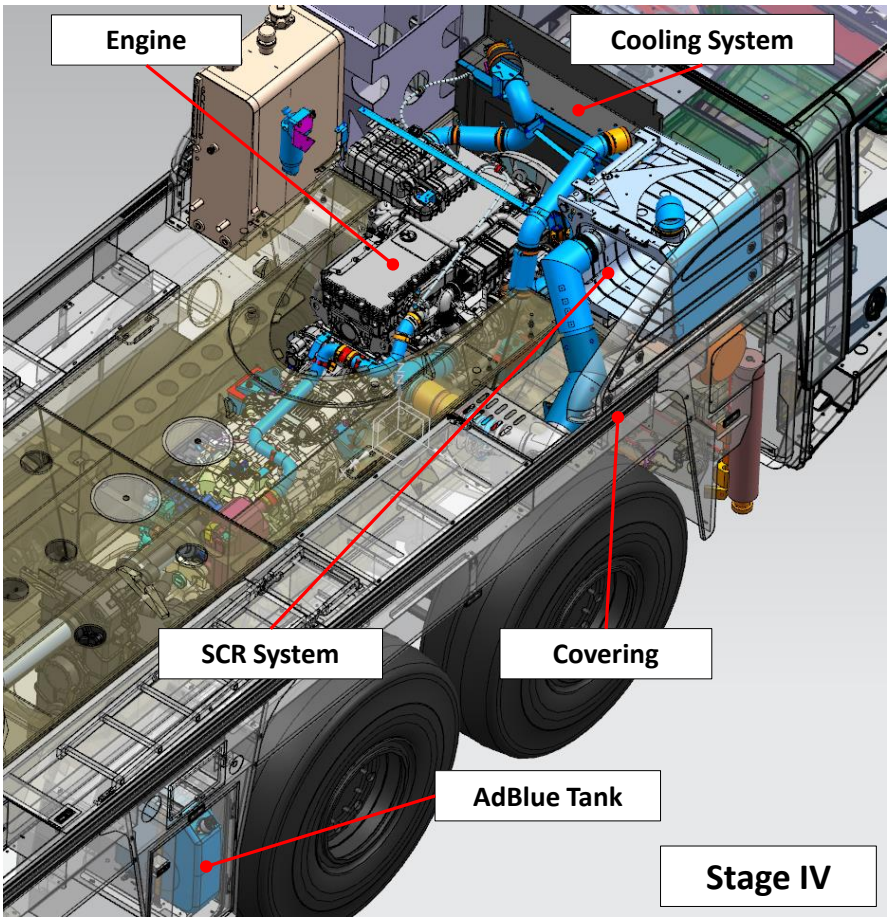

Abbildung C-16: Einbausituation im AT-Kran Unterwagen, vier Achsen für Motor und Abgasnachbehandlungssystem der Stufe IV

Die Kühlanlage ist komplett neu, da sich die Anforderungen des Motors sehr stark verändert haben. Im Zuge dessen hat sich die maximal zulässige Kühlwassertemperatur erhöht. Dies bedeutet, dass die Bauteile der Flüssigkeitskühlung an das höhere Temperaturniveau und den damit einhergehenden gestiegenen Betriebsdruck angepasst werden müssen. Geändert wurde auch die Abgasverrohrung, weil eine neue Eindosierung des Harnstoffs erfolgt und ein neuer SCR-Katalysator eingesetzt wird. Auch der AdBlue Tank und das Pumpenmodul sind neu und müssen erneut inte-

griert werden. Die ebenfalls neue Dosiereinheit muss nun in die Abgasverrohrung integriert werden. Änderungen ergeben sich weiterhin an der Unterwagenverkleidung und der Staubox zwischen Achse zwei und drei. Zusätzlich muss die Motorverkleidung neu konstruiert werden.

Die Gewichtszunahme nur im Unterwagen beträgt gegenüber der Stufe III B 173 kg und gegenüber der Stufe III A sogar 337kg. Mit der zusätzlichen Zunahme im Oberwagen von 133 kg im Vergleich zur Stufe III B werden mit der gesamten Gewichtszunahme von 306 kg wieder Anpassungen am Gegengewicht erforderlich, um die Straßenzulassung zu ermöglichen. Auch müssen die Lasttabellen wieder neu berechnet werden.

C.4 Konstruktive Änderungen am AT-Kran mit fünf Achsen durch neue Motorsysteme der Stufe III B und Stufe IV

Zu den in den vorhergehenden Beispielen aufgezeigten Änderungen am Ober- und Unterwagen werden im Folgenden die Auswirkungen durch Änderungen der Abgasnachbehandlung am gesamten AT-Kran dargestellt. Abbildung C-17 zeigt das in der folgenden Beschreibung betrachtete fünfachsige Kranmodell.

Abbildung C-17: Ansicht AT-Kran, 5 Achsen, Traglast 220 Tonnen

Änderungen des Motorsystems

Die Änderungen am Motorsystem für den Einbau im Ober- und Unterwagen für die Stufen III B und IV sind analog zu den in Kapitel C.2 und Kapitel C.3. Hier änderte sich jedoch beim Motorenhersteller die Motorbauart der Stufe IV von einer V-

förmigen Zylinderanordnung in eine Reihenbauweise. Ein Vergleich der Bauarten zeigt Abbildung C-18. Durch diese Umstellung ergaben sich deutlich veränderte Abmessungen des Motors, die Breite nahm um 50 mm, die Höhe um 100 mm und die Länge um 300 mm zu. Neben den Veränderungen in den Abmessungen wandelten sich auch die Proportionen des Motors. Wie in Abbildung C-18 zu sehen, nimmt der Motor der Stufe IV wesentlich mehr Bauraum im vorderen oberen Bereich in Anspruch als der Stufe III B Motor.

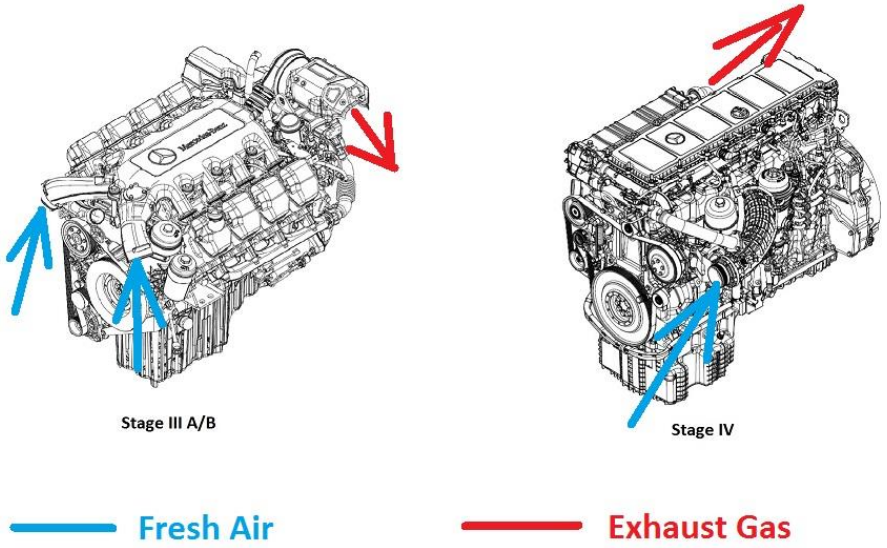

Abbildung C-18: Vergleich Motorbauart und Bauraum der Stufe III A/B und der Stufe IV zum Einbau im AT-Kran Unterwagen

Änderungen am AT-Kran

Die Änderungen am Motor und der Abgasnachbehandlung führten auch in diesem Beispiel zu zahlreichen Anpassungen in der Anordnung von Komponenten am Kran. In Abbildung C-19 ist zu erkennen, dass die Unterbringung des größeren Abgaskatalysators der Stufe III B im Unterwagen Änderungen in der Anordnung der Auslegerbauteile am Oberwagen zur Folge hatte. Um Kollisionen mit dem neuen SCR-Katalysator zu vermeiden, mussten die Schlauchtrommel und die Kabeltrommel weiter nach hinten versetzt werden und in ihren Positionen getauscht werden. Weiterhin ist der SCR-Katalysator in Fahrtrichtung links im Vergleich zum Abgastopf der Stufe III A nun vor dem Wasserkühler angeordnet. Entsprechende Änderungen mussten hierzu auch an den Zu- und Abläufen für das Kühlwasser, für Schlauchleitungen zum hydraulischen Antrieb des Lüfters sowie an elektrischen Leitungen für Sensoren des Kühlsystems vorgenommen werden.

Abbildung C-19: Änderungen am AT-Kran wegen motorbedingten Anpassungen im Unterwagen der Stufe III B im Vergleich zur Stufe III A

Für Unter- und Oberwagen mussten weitere zahlreiche Änderungen zur Information des Fahrers / Bedieners softwareseitig für Kran- und Fahrbetrieb eingepflegt werden. Dazu gehörten unter anderem eine Anpassung der Kransteuerung (Software) zur Verarbeitung der Signale des Abgasnachbehandlungssystems (Status- und Fehlermeldungen, AdBlue Füllstand, etc.) sowie eine Anpassung in der Display-Software zur Visualisierung. Zusätzlich mussten im Fahrerhaus sowie in der Krankabine neue Leuchten und Schalter implementiert werden. Dass bestimmte Informationen zum Abgasnachbehandlungssystem dem Fahrer / Bediener visuell und akustisch mitgeteilt werden, ist durch den Gesetzgeber vorgeschrieben und muss von allen Herstellern umgesetzt werden. Mit Einführung der Stufe IV wurde im Rahmen aufwendiger und zeitintensiver Studien festgestellt, dass eine erneute Anpassung des Oberwagens zur Aufnahme eines Motor- und Abgassystems der Stufe IV mit folgenden Herausforderungen verbunden wäre:

- Bauraumbedarf des Stufe IV Motors ist größer als bei III A und III B.
- Zusätzliches Gewicht der Komponenten ist nicht mehr kompensierbar.
- Einbaurichtlinien zur Verlegung von Abgasrohren und Katalysator schränken die Anordnung umgebender Bauteile des Kranes weiter ein.

Für die Konstruktion des Unterwagens galt es folgende Konflikte zu lösen:

- Unterbringung des größeren Dieselmotors im Unterwagen.
- Vermeidung von Kollisionen des neuen Motors mit größerer Bauhöhe im Unterwagen mit Bauteilen des Auslegers am Oberwagen.

Anhang D Berechnungsmodell für Abgasemissionen von All-Terrain Kranen

Zur Berechnung der Schadstoffemissionen von mobilen Maschinen und Geräten sowie des Straßenverkehrs haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche Herangehensweisen etabliert, welche an dieser Stelle kurz erläutert werden. Der Fokus liegt innerhalb der vorliegenden Studie auf der Berechnung von Partikel- und Stickoxid-Emissionen, da diese Schadstoffe durch die Einführung der letzten Emissionsstufen und auch bei Stufe V stärker reglementiert werden.

Bestehende Modelle und Beschreibung des verwendeten Modells

Im Wesentlichen existieren zur Berechnung der Schadstoffemissionen aus mobilen Maschinen und Geräten zwei unterschiedliche Ansätze, die in [Hel-2014a] kurz skizziert und gegenübergestellt werden. Im sog. Top-Down-Ansatz werden Kraftstoffverbräuche eines gesamten Sektors bzw. der Maschinenpopulation herangezogen und mit einem Emissionsfaktor multipliziert, um die Masse der emittierten Schadstoffe quantifizieren zu können. Eine Anwendung dieser Methode und die entsprechenden Berechnungsgleichungen zur sektoralen Bestimmung der Emissionsmenge finden sich beispielsweise in [Kle-2012].

Demgegenüber seht der sog. Bottom-up-Ansatz, bei dem ausgehend von der Modellierung des Maschinenbestandes hinsichtlich Alter und Leistungsklassen die entsprechenden Abgasgesetzgebungsstufen und die korrespondierenden, energiebedarfsbezogenen Basisemissionsfaktoren abgeleitet werden. Ein sehr weitverbreitetes Modell, das diesen Ansatz konsequent verfolgt, ist das vom ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg in [Hel-2004, Hel-2009] vorgestellte Modell TREMOD-MM, das insbesondere für die Berechnung von Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von mobilen Maschinen und Geräten entwickelt wurde und in der Vergangenheit bereits häufiger auf diesem Sektor Anwendung gefunden hat [Hel-2014a, Hel-2014b]. In Abbildung D-1 ist das Vorgehen bei der Gliederung des Bestandes und der Ableitung der Basisemissionsfaktoren für die Anwendung auf AT-Krane dargestellt.

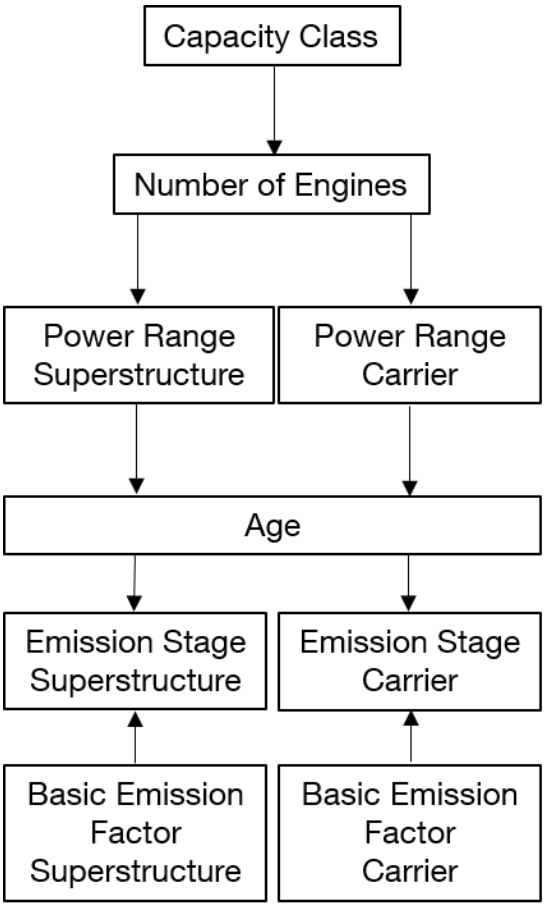

Abbildung D-1: Vorgehen zum Ableiten der Basisemissionsfaktoren für AT-Krane

Ausgangsbasis für das Berechnungsmodell ist eine Einteilung des Kranbestandes nach der maximalen Tragfähigkeit, da sich hieraus die benötigte Antriebsleistung für den Kranbetrieb und die Anzahl der Achsen des Unterwagens und damit dessen benötigte Motorleistung klassifizieren lassen. Im nächsten Schritt erfolgt die Klassifizierung nach dem Antriebskonzept, da bei kleineren Maschinen bis ca. 80 t Tragfähigkeit nur ein Motor verbaut wird, bei größeren Maschinen hingegen ein separater Motor im Oberwagen eingebaut ist. Mithilfe des Baujahres bzw. des Alters der Maschine kann auf die Abgasemissionsstufe nach der EU-Richtlinie 97/68/EG geschlossen werden, woraus in einem weiteren Schritt die Basisemissionsfaktoren bestimmt werden können. Die Berechnung der Abgasemissionen bzw. des Kraftstoffverbrauchs EM_S für den Bestand an Kranen in jeder Tragfähigkeitsklasse pro Jahr erfolgt nach Gleichung (6-1):

$$EM_S = n \cdot (P_C \cdot Z_C \cdot LF_C \cdot EF_C + P_S \cdot Z_S \cdot LF_S \cdot EF_S) \qquad (6\text{-}1)$$

Darin bezeichnet *n* die Anzahl der Krane dieser Tragfähigkeitsklasse, *P* die installierte Motorleistung, *Z* die jährlich anfallenden Betriebsstunden, *LF* bezeichnet den Lastfaktor und *EF* den Emissionsfaktor. Die Indizes beziehen sich auf den Unterwa-

gen (*C*) und den Oberwagen (*S*), da hier unterschiedliche Leistungen und Lastfaktoren bei einem Kran verwendet werden müssen.

Der Emissionsfaktor ergibt sich aus einem energiebezogenen Basisemissionsfaktor EF_B, der mit einem transienten Anpassungsfaktor *TAF* und einem altersabhängigen Verschlechterungsfaktor *DF* beaufschlagt wird. Die Berechnung der Emissionsfaktoren für den Unterwagen (Index *C*) und den Oberwagen (Index *S*) wird in den Gleichungen (6-2) und (6-3) dargestellt.

$$EF_C = EF_{BC} \cdot TAF_C \cdot DF_C \tag{6-2}$$

$$EF_S = EF_{BS} \cdot TAF_S \cdot DF_S \tag{6-3}$$

Die Werte für die einzelnen Faktoren, die dem Abgasemissionsinventar zu Grunde liegen, sowie der Modellierungsansatz für den Bestand an AT-Kranen wird im Folgenden vorgestellt.

Aufgenommene Daten und Anwendung des Berechnungsmodells

In diesem Abschnitt werden die von den Kranherstellern zur Verfügung gestellten Basisdaten für das Abgasemissionsinventar von AT-Kranen in aggregierter Form und die daraus gewonnenen Erkenntnisse dargestellt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Absatzzahlen für die einzelnen Kranmodelle der letzten Jahre in der Europäischen Union, Daten zum Nutzungsverhalten und Daten zu Motorleistungen bzw. zum Aufbau und Einsatz der Krane. In Tabelle D-1 sind diese Basisdaten herstellerübergreifend dargestellt.

Tabelle D-1: Basisdaten für das Emissionsinventar

	Wert	Einheit
Anzahl All-Terrain-Krane in der EU	19.000	[Stück]
Lastfaktor Unterwagen	0,25	[-]
Lastfaktor Oberwagen (Zwei-Motoren-Kran)	0,2	[-]
Lastfaktor Oberwagen (Ein-Motor-Kran)	0,08	[-]
Jährliche Anzahl Betriebsstunden im Kranbetrieb	1200	[h]
Jährliche Anzahl Betriebsstunden im Fahrbetrieb	400	[h]

Die aktuellen Populationsdaten für AT-Krane werden mithilfe des im Anhang G dargestellten Fragebogens bei den Herstellern angefragt. Insgesamt kann damit von einem Bestand von AT-Kranen von 19.000 Einheiten ausgegangen werden, die auch als Basisgröße für die Berechnung dient. Da es sich beim europäischen AT-Kran-Markt im Wesentlichen um einen Austauschmarkt handelt, bei dem alte Maschinen durch neue ersetzt werden, wird der Bestand für alle durchgeführten Berechnungen konstant bei 19.000 Einheiten belassen. Der Lastfaktor für den Unterwagen wird mit 0,25 festgelegt und mithilfe von Kraftstoffverbrauchsangaben aus Feldversuchen verifiziert. Das Gleiche gilt für den Lastfaktor für den Kranbetrieb im Oberwagen, der bei den kleineren Ein-Motor-Geräten mit 0,08 festgelegt wird und bei den Zwei-Motoren-Kranen mit einem Wert von 0,2 veranschlagt wird. Diese Werte werden durch Vergleiche mit gemessenen Kraftstoffverbräuchen verifiziert. Zur Bestimmung der jährlichen Betriebsstunden im Fahr- und im Kranbetrieb werden Datenloggeraufzeichnungen ausgewertet und die Kranhersteller befragt. Die angegebenen Werte von 1.200 Betriebsstunden im Kranbetrieb und 400 Stunden im Fahrbetrieb können nach Herstellerangaben als Obergrenze angesehen werden. Damit ergibt sich für jeden Kran in der Europäischen Union eine jährliche Einsatzzeit von 1.600 Stunden, was annähernd einem Ein-Schicht-Betrieb entspricht. Die Anzahl der Betriebsstunden wird unabhängig von der Größe des Krans und vom Alter der Maschine angesetzt. Diese Annahme liegt darin begründet, dass die meisten Mobilkrane im Vermietungsgeschäft eingesetzt werden und der Betreiber großes Interesse daran hat, mit dem Kran Umsatz zu generieren, unabhängig davon wie alt die Maschine ist. Zur Ableitung der Basisemissionsfaktoren muss eine Altersstruktur für den Bestand festgelegt werden, die auf jedes Berechnungsjahr angewandt wird.

Abbildung D-2 zeigt die Altersstruktur des AT-Kranbestandes nach einem Kosinus-Ansatz, wie er auch in [Hel-2014] in ähnlicher Weise zur Anwendung kommt. Für die hier durchgeführten Berechnungen werden die Neuzugänge im Bestand auch mit der vollen Anzahl erfasst.

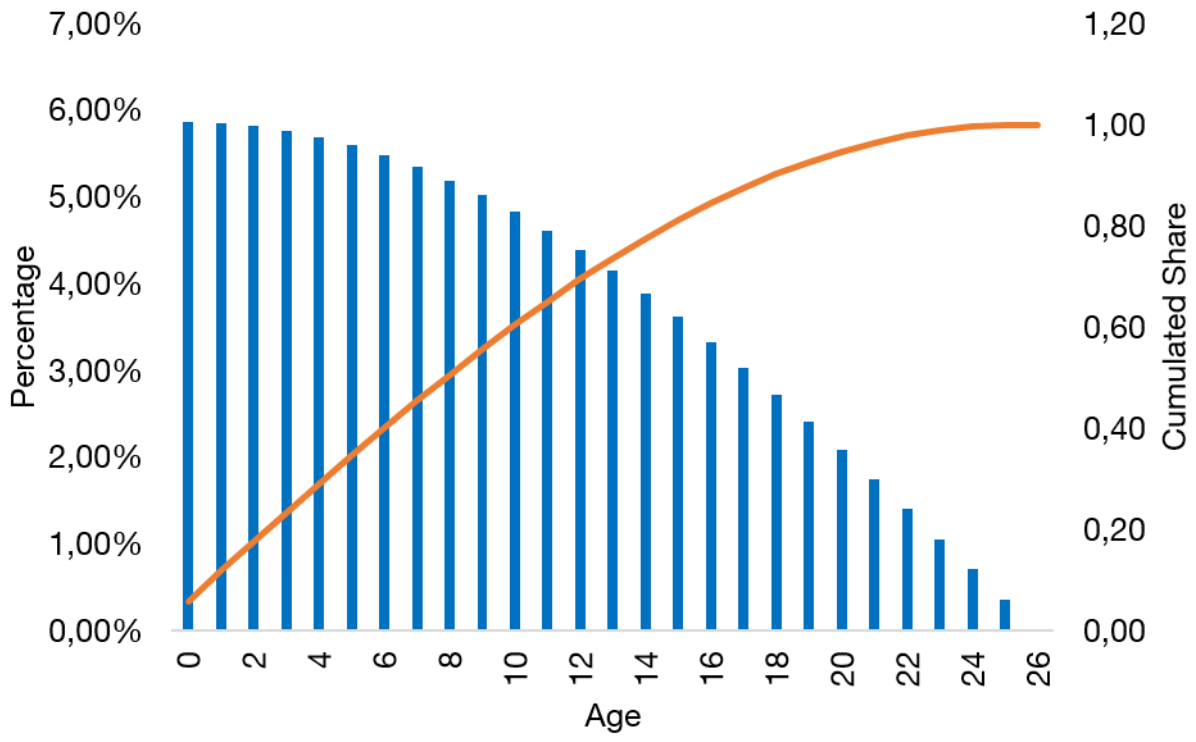

Abbildung D-2: Altersstruktur für All-Terrain-Krane in der Europäischen Union

Das mittlere Alter im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird mit 13 Jahren angenommen, so dass die ältesten Maschinen deutlich über 20 Jahre alt sind. In einem weiteren Schritt wird die Klassifizierung des Bestandes durchgeführt, um die Motorleistungen für die Bestandsmaschinen ableiten zu können. Hierbei wird auch die Besonderheit von AT-Kranen berücksichtigt, die ab einer Tragfähigkeit von ca. 80 t mit zwei Motoren ausgestattet sind. In Abbildung D-3 ist die Bestandsstruktur zur Bildung der unterschiedlichen Leistungsklassen für das Berechnungsmodell TREMOD-MM dargestellt.

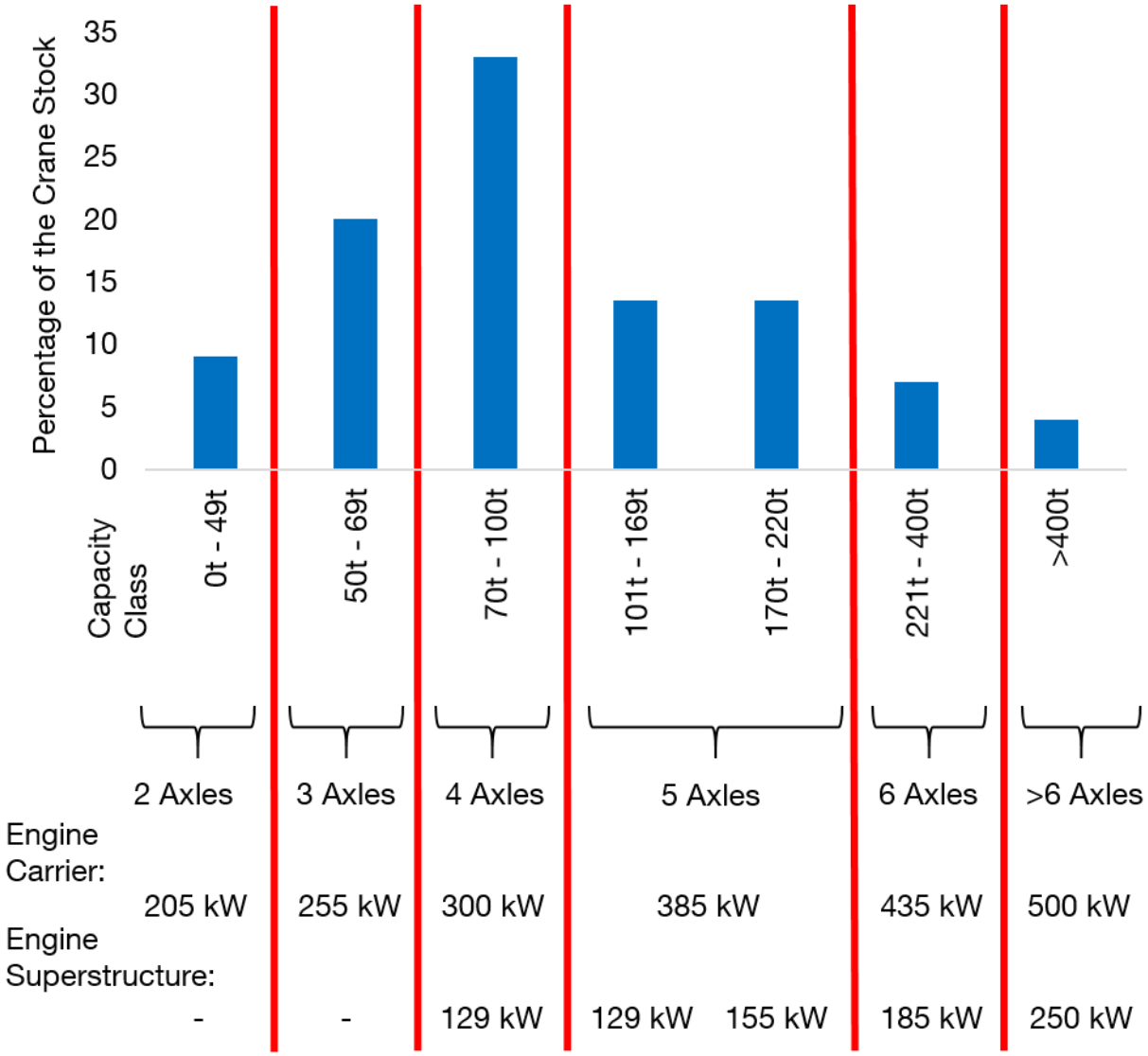

Abbildung D-3: Bestandsstruktur von All-Terrain-Kranen in der Europäischen Union

Da AT-Krane in erster Linie nach ihrer Tragfähigkeit verkauft werden, erscheint es sinnvoll, diese Maschinen in ein solches Raster einzuteilen und davon ausgehend die eingesetzten Motoren und deren Leistungen abzuleiten. Die Einteilung erfolgt mithilfe der Verkaufszahlen aus den Jahren 2011 bis 2013, aus denen der Abbildung D-3 dargestellte Bestandsanteil der jeweiligen Tragfähigkeitsklasse abgeleitet wird. Die Kategorie 0-49 t maximale Tragfähigkeit bilden Maschinen mit einem zweiachsigen Fahrgestell und einer mittleren Leistung von 205 kW im Unterwagen, es wird kein separater Oberwagenmotor verwendet. In der zweiten Kategorie von 50t bis 69 t maximaler Tragfähigkeit finden sich ebenfalls nur Ein-Motor-Maschinen, die auf einem dreiachsigen Fahrgestell aufgebaut sind. Ab den vierachsigen Maschinen werden für die Modellierung grundsätzlich Zwei-Motoren-Krane angesetzt, wobei die installierte Motorleistung im Unterwagen mit dem Gesamtgewicht der Maschine und damit der Anzahl der Achsen bis zu den Großgeräten mit über 400 t Tragfähigkeit auf 500 kW ansteigt. Gleiches gilt für die verbauten Motorleistungen im Ober-

wagen, die von 129 kW beim Vier-Achser und beim kleinen Fünf-Achser bis auf 250 kW bei den Großgeräten ansteigen. Im Bereich der fünfachsigen Maschinen werden zwei Tragfähigkeitsklassen gebildet, da sich hier die verwendeten Leistungen des Oberwagenmotors deutlich unterscheiden. Damit wird berücksichtigt, dass bei den kleineren Maschinen die Einführung der jeweils nächsten Stufe der Abgasgesetzgebung zeitversetzt stattfindet. Der vorgestellten Klassifizierung von AT-Kranen liegen einige Annahmen zu Grunde, die im Folgenden kurz dargestellt und bewertet werden sollen:

- Da für die Klassifizierung des Bestandes die Mittelwerte aus den Verkaufszahlen der Jahre 2011 bis 2013 angesetzt werden, ergeben sich tendenziell zu viele Großgeräte mit entsprechend hohen Motorleistungen im Bestand. In der Realität wurden aber erst in jüngerer Vergangenheit Krane dieser Tragfähigkeitsklassen von allen Herstellern entwickelt und verkauft. In dieser Hinsicht handelt es sich bei der getroffenen Klassifizierung um ein Worst-Case-Szenario.
- Ab den vierachsigen Maschinen wird generell von einem Zwei-Motoren-Konzept ausgegangen, das für alle Berechnungsszenarien beibehalten wird. Seit kurzem sind auf dem Markt aber auch Konzepte für größere Krane mit nur noch einem Motor zu finden. Da die Anzahl und Größe der Motoren aber keinen Einfluss auf die im Kranbetrieb abgerufene Leistung besitzt, kann man davon ausgehen, dass auch das Kraftstoffverbrauchs- und Schadstoffemissionsverhalten keine gravierenden Unterschiede aufweist. Die berechneten Emissionswerte liegen für die gewählte Modellierung auf einem vergleichbaren Niveau.
- Die aktuell in Fahrzeugkranen eingesetzten Motoren haben durch den Einsatz von Aufladung tendenziell mehr Leistung als die Motoren in der Vergangenheit. Für Berechnung der Abgasemissionen nach dem Modell TREMOD-MM spielt das aber keine Rolle, da hier nur die tatsächlich abgeforderte Leistung berücksichtigt wird und diese sich aus dem Arbeitsprozess ergibt.

Neben diesen allgemeinen Annahmen zur Bestandsmodellierung für das Berechnungsmodell, sind vor allem die Basisemissionsfaktoren, die Faktoren zur Verschlechterung und die transienten Anpassungsfaktoren von maßgebender Bedeutung. Da das Berechnungsmodell TREMOD-MM bereits in mehreren Studien zum Abgasemissionsverhalten von mobilen Maschinen und Geräten zur Anwendung gekommen ist, besteht eine sehr gute Datengrundlage zu diesen Faktoren, auf die auch im Rahmen dieser Studie zurückgegriffen werden kann. In Tabelle D-2 werden die verwendeten Basisemissionsfaktoren EF_B, die in [Lam-2004] und [Hel-2009] zusammengefasst werden, für die Partikel und Stickoxidemissionen dargestellt. Dabei ist eine Aufteilung in die Leistungsklassen 75 kW-130 kW und 130 kW-560 kW not-

wendig, da im Oberwagen einige Motoren mit einer Leistung von 129 kW anzutreffen sind.

Tabelle D-2: Basisemissionsfaktoren für das Emissionsinventar

	75 – 130 kW		130 – 560 kW	
	NO_x [g/kWh]	PM [g/kWh]	NO_x [g/kWh]	PM [g/kWh]
Bis 1990	11,8	1	12,4	0,8
1991 – Stufe I	13,3	0,4	11,2	0,4
Stufe I	8,1	0,2	7,6	0,2
Stufe II	5,2	0,2	5,2	0,2
Stufe III A	3,2	0,3	3,2	0,2
Stufe III B	3	0,025	1,8	0,025
Stufe IV	0,4	0,025	0,4	0,025
Stufe V	0,4	0,015	0,4	0,015

Für die Stufe V werden als Basisemissionsfaktoren die Grenzwerte aus dem Vorschlag für die Einrichtung dieser neuen Emissionsstufe verwendet. Für die Stufe IIIA werden bei Partikeln auch die Grenzwerte aus der Richtlinie 97/68/EG verwendet. Für den Kraftstoffverbrauch, der als Kontrollgröße mit in die Berechnung aufgenommen wird, werden die in [Lam-2004] dargestellten Basisfaktoren verwendet.

Der Verschlechterungsfaktor beziffert die jährliche Erhöhung des Ausstoßes von Schadstoffen auf Grund von Verschleiß am Motor. Da die in der Richtlinie 97/68/EG bzw. deren Änderungsdirektiven vorgegebenen Grenzwerte ab Stufe III A die Verschlechterung für einen vorgegebenen Zeitraum bereits enthalten und die gewählten Basisemissionsfaktoren für diese Stufen den Grenzwerten entsprechen, wird hier auf die Beaufschlagung des Basisemissionsfaktors mit einem zusätzlichen Verschlechterungsfaktor verzichtet. Von Seiten der Motorenhersteller wurde im Rahmen der durchgeführten Befragung ebenfalls bestätigt, dass sich die Emissionen während der Dauerhaltbarkeitsversuche nicht verschlechtern, so dass mit dem vorgestellten Ansatz gerechnet wird. Für die Abgasemissionsstufen vor Stufe III A wird der in [Lam-2004] vorgestellte altersabhängige und auf dem Vorgehen des US-EPA basierende Ansatz verwendet. Die entsprechenden Quellen und Angaben für die Herleitung können ebenfalls [Lam-2004] entnommen werden. In Abbildung D-4 ist der ge-

wählte Ansatz für den Verschlechterungsfaktor hinsichtlich Partikelemissionen für die Stufen vor III A dargestellt.

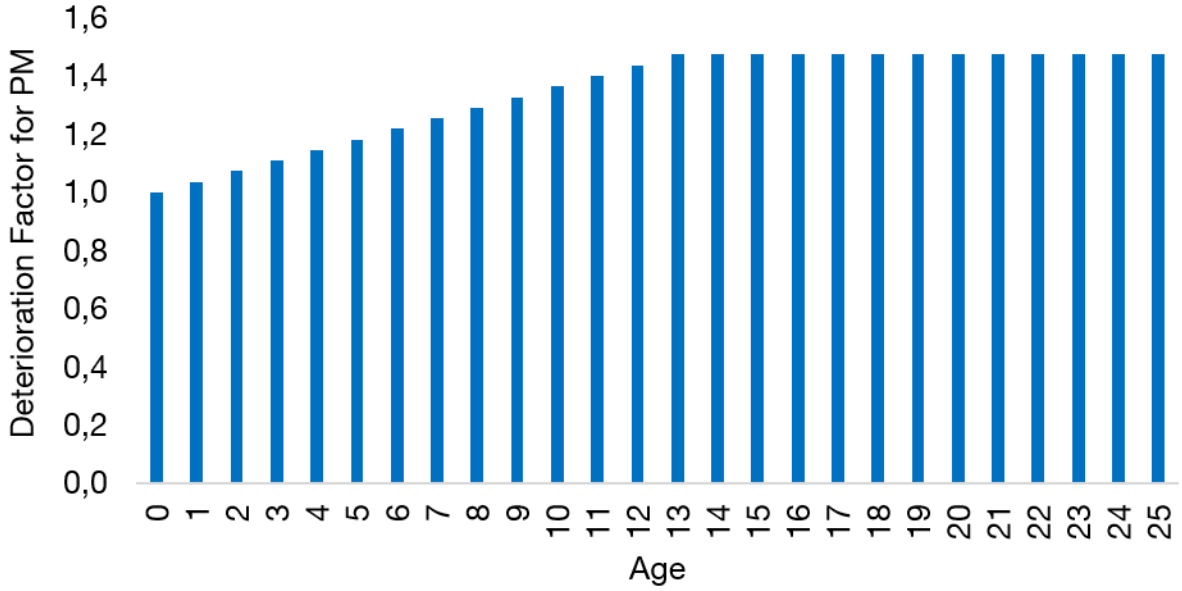

Abbildung D-4: Verschlechterungsfaktor für Partikelemissionen für die Stufen vor IIIA

Der Höchstwert der Verschlechterung wird im gewählten Ansatz bei der mittleren Lebensdauer, in diesem Fall bei 13 Jahren erreicht. Für die Stickoxidemissionen wird der gleiche Ansatz gewählt, allerdings ist hier die maximale Verschlechterung bei der mittleren Lebensdauer deutlich geringer.

Neben dem Verschlechterungsfaktor wird der transiente Anpassungsfaktor im Modell TREMOD-MM eingeführt, mit dem berücksichtigt wird, dass der Basisemissionsfaktor bis Stufe III A in einem stationären Zyklus bestimmt wird, die Maschine aber einer dynamischen bzw. transienten Nutzung unterliegt [Lam-2004]. Die Herleitung dieser Faktoren basiert in der aktuellsten Form, die in [Hel-2014] zu finden ist, auf Untersuchungen des US-EPA und der TU Graz. Des Weiteren werden diese Faktoren, die nur für hohe Lastfaktoren (>0,45) und niedrige Lastfaktoren (<0,25) aus den genannten Voruntersuchungen bekannt sind, noch um eine Klasse für mittlere Lasten im Bereich 0,25 > LF < 0,45 durch das ifeu-Institut erweitert [Hel-2014]. Gerade für den Fahrbetrieb im Unterwagen ist diese Klasse von Bedeutung, da hier der Lastfaktor bei 0,25 angesetzt wird. Die Tabelle D-3 zeigt die Übersicht über die gewählten transienten Anpassungsfaktoren.

Tabelle D-3: Transiente Anpassungsfaktoren für das Emissionsinventar

	Niedriger Lastfaktor		Mittlerer Lastfaktor	
	NO_x [-]	PM [-]	NO_x [-]	PM [-]
Bis 1990	1,1	1,97	1,03	1,6
1991 – Stufe I	1,1	1,97	1,03	1,6
Stufe I	1,1	1,97	1,03	1,6
Stufe II	1,1	1,97	1,03	1,6
Stufe III A	1,21	2,37	1,125	1,92
Stufe III B	1	1	1	1
Stufe IV	1	1	1	1
Stufe V	1	1	1	1

Damit liegen alle Basisangaben für das in Kapitel 4 vorgestellte Abgasemissionsinventar von All-Terrain-Kranen und die in Abschnitt 6.4 getroffenen Projektionen hinsichtlich der Einführung einer Stufe V in der aktuellen Abgasemissionsgesetzgebung vor.

Anhang E Berechnungsvorgehen der Trend-Impact Analysis

Die Berechnung der Trend-Impact Analysis nutzt analog zu Kapitel 4 das in Anhang D ausführlich vorgestellte Berechnungsmodell TREMODD-MM nach [Lam-2004, Hel-2009, Hel-2014a, Hel-2014b]. Mit diesem Modell, den Basisdaten zu Emissionsfaktoren und den auf Basis der Fragebögen ermittelten Nutzungsdaten werden die PM- und NO_x-Emissionen berechnet.

Für die Trend-Impact Analysis werden die in den Szenarios (Kapitel 6.3) definierten Übergangsfristen für eine Umstellung von Stufe IV auf Stufe V verwendet und für jedes Szenario die jährlich anfallenden Emissionen berechnet. Der betrachtete Zeitraum bezieht sich dabei analog zu [SWD (2014) 281] auf die Jahre 2020 bis 2050. Aus diesen Werten wird für die Szenarien 2, 3 und 4 die jährlich eingesparte Masse an Partikelemissionen im Vergleich zum Basisszenario 1 berechnet und damit die Grundlage für eine kostenmäßige Bewertung in Kapitel 6.5 gelegt.

Anhang F Berechnungsvorgehen und getroffenen Annahmen für die Cost-Effectiveness-Analysis

Nach Angaben der Motorenhersteller wird für AT-Krane mit der Einführung der Stufe V ein DPF zum SCR-System hinzukommen. Auf dieser Grundlage werden die Kosten für die Einführung eines Grenzwertes für PN für Fahrzeugkrane nach [SWD (2014) 281] ermittelt (Dieselmotorleistungsklasse 56-560 kW). Für alle Kosten und monetarisierten Vorteile wird ein jährlicher Diskontsatz von 4 Prozent berechnet.

Kosten

Zuerst erfolgt die Ermittlung der Kosten für die Implementierung der DPF-Technolgie. Diese setzten sich zusammen aus:

a) Kosten für Motorenhersteller
b) Kosten für AT-Kran Hersteller
c) Kosten für Betreiber

a) Kosten für Motorenhersteller

Die Europäische Kommission geht im IA [SWD (2014) 281] Annex Table III von DPF Kosten pro Einheit von 2.305 € für 75-130 kW; 4.951 € für 370 kW und 5.958 € für 485 kW aus. Da in AT-Kranen Motoren aus diesen Leistungsklassen verbaut sind, wird der Mittelwert von 4.400 € pro DPF Einheit für AT-Krane angenommen.

Weiterhin nimmt die Europäische Kommission nur 20 Prozent der DPF Kosten pro Einheit für Motoren in den Leistungsklassen 37-560 kW für die Berechnung an, weil angenommen wird, dass DPF in diesem Bereich schon überwiegend im Einsatz sind. Für AT-Krane ist dies nicht der Fall. Da jedoch die Technologie schon im Lkw Bereich erfolgreich im Einsatz ist, aber an den Einsatz in AT-Kranen angepasst werden muss, wird in dieser Studie mit 50 Prozent der DPF Kosten, 2.200 € pro Einheit, gerechnet. Dieser Wert deckt sich im Wesentlichen auch mit den Kostenschätzungen der Motorenhersteller aus der Datenaufnahme.

Es wird mit fallenden Grenzkosten pro DPF Einheit um 20 Prozent alle vier Jahre gerechnet. Der Bestand an AT-Kranen in Europa ist konstant, so dass auf Grund der jährlichen Verkaufszahlen mit 1.906 zusätzlichen DPF Einheiten gerechnet wird (324 Ein-Motoren-Krane und 791 Zwei-Motoren-Krane).

b) Kosten für Fahrzeugkranhersteller

Die Prognose der technischen Aspekte und den damit verbundenen wirtschaftlichen Auswirkungen (Kapitel 6.1und Kapitle 6.2) hat gezeigt, dass der Aufwand für die Änderungen am AT-Kran zur Umsetzung der Stufe V ähnlich den Änderungen für die Umstellung auf Stufe III B sein wird. Somit werden die Kosten für die Umstellung von AT-Kranen auf Stufe V für die Fahrzeugkran-Branche i. H. v. 31,8 Mio. € angenommen (vgl. Kapitel 5.3). Dazu addiert wird die Hälfte der ermittelten Lagerkosten für die beiden letzten Umstellungsstufen, da die Hersteller weiterhin Motoren vorkaufen und lagern müssten. Die Summe von 34,06 Mio. € wird als Investition für die Umstellung aller AT-Krane für die Fahrzeugkran-Branche angenommen. Der Betrag wird auf die ersten vier Jahre verteilt.

c) Kosten für Betreiber

Zusätzliche Kosten für die Betreiber durch einen DPF werden nicht berücksichtigt. Zwar wird voraussichtlich mehr Diesel für eine aktive Regenerierung des DPF verbraucht, jedoch wird der Motor nach Angaben der Motorenhersteller effizienter sein, so dass sich der Mehrverbrauch an Treibstoff wieder ausgleicht.

Nutzen

Auf Basis der zu erwartenden Reduzierung von PN wird die Wirksamkeit (Nutzen) für Umwelt und Gesundheit ermittelt. Der Gesamtnutzen ergibt sich aus der Summe vermiedener Emissionen im Vergleich zum BAU Szenario im Betrachtungszeitraum für die erstellten Szenarien (vgl. Kapitel 6.4). Durch Multiplikation der jährlichen vermiedenen Emissionen mit einem Belastungsfaktor, der für die geldwerten Gesundheitsvorteile in Einheiten pro vermiedener Tonne steht, werden die jährlich vermiedenen Kosten ermittelt und summiert. Die vermiedenen Schadenskosten werden nach [CEDe-2011] wie im IA SWD 281 mit 130.000 €/t für $PM_{2.5}$ für das als wahrscheinlich geltende Szenario mit einem mittleren Einfluss angenommen. Da emittierte Partikel aus Dieselverbrennungsmotoren in der Regel im aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm sind [Kle-2012], wird für diese Berechnung angenommen, dass die in Kapitel 4.2 berechneten PM Einsparungen den $PM_{2.5}$ Einsparungen entsprechen.

Anhang G Fragebogen zur Datenaufnahme bei Motorenherstellern

Einleitung

Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) (Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner) an der Technischen Universität München wurde von der Fédération Européenne de la Manutention (FEM) Product Group Cranes and Lifting Equipment (CLE) Mobile Cranes (MC) beauftragt eine Studie mit der folgenden Zielsetzung durchzuführen:

- Aufzeigen der technischen Maßnahmen und wirtschaftlichen Aspekte der Umstellungen von Fahrzeugkranen (speziell am Beispiel All-Terrain-Krane (AT-Kran) durch Änderungen am Motor für die Stufe III A auf III B und III B auf IV gemäß der Richtlinie 97/68/EG.
- Analyse des Einflusses von AT-Kranen auf Abgasemissionen (PM und NO_x) im Verhältnis zu Baumaschinen und gesamt Non-Road-Mobile-Machinery (NRMM) in Europa.
- Projektion technischer und wirtschaftlicher Aspekte für AT-Krane auf Grund neuer Motoren der Stufe V (Änderungen Motor und Auswirkungen auf AT-Krane) sowie Einfluss auf Abgasemissionen.

Diese Ziele sollen erreicht werden, indem u. a. Informationen von Kranherstellern zu bisherigen Umsetzungen (Stufe III A auf III B und III B auf IV) mit Hilfe von Fragebögen und Interviews gesammelt werden. (Weitere Informationen können dem Positionspapier FEM CLE MC N 0697 entnommen werden).

Weiterhin soll eine Projektion für die Umsetzung der Stufe V für AT-Krane erfolgen, hierfür sind insbesondere Informationen von Motorenherstellern notwendig. Diese Informationen sollen mit dem folgenden Fragebogen bei Ihnen erhoben werden.

Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen **bis zum 25.11.2014** an Frau Julia Freis: freis@fml.mw.tum.de. Für weitere Fragen zum Fragebogen steht Frau Freis (Tel: +49 89 289 15994) ebenfalls als Ansprechperson gerne für Sie zur Verfügung.

Fragebogen		
A	**Zeitplan der Einführung der Emissionsstufe V bei Motorenherstellern**	
	1	Zu welchem Datum werden 3D-CAD-Daten aller Motoren (mit Peripherie und Abgasnachbehandlungssystemen), angepasst an die Einbausituation in die unterschiedlichen Modelle der Mobilkrane, verfügbar sein?
	Termin „Design Freeze“ für die gesamte Hardware (dd.mm.yyyy):	
	2	Zu welchem Datum sind C-Muster und D-Muster aller erforderlichen Motortypen (mit Abgasnachbehandlungssystem, Hardware, Software und Diagnose) für Mobilkrane verfügbar?
	Termin Lieferung C-Muster (dd.mm.yyyy): Termin Lieferung D-Muster (dd.mm.yyyy):	
	3	Zu welchem Datum wird die Serienlieferung für alle Motortypen (zertifiziert) für Mobilkrane erfolgen?
	Termin Serienlieferung zertifizierter Motoren (dd.mm.yyyy):	
B	**Änderungen der Motoren Stufe V gegenüber der Stufe IV** (für den Motorblock, die emissionsmindernden Einrichtungen, die Kommunikationsschnittstellen und etwaige andere Steuereinheiten)	
	4	Beschreiben Sie die Änderungen:
	Änderungen der Motoren für AT-Krane inkl. Komponenten (Turbolader, Ladeluftkühlung, Einspritzsystem, AGR-System, Kühlsystem): Änderungen an den emissionsmindernden Einrichtungen (was ist neu und was wird sich wie ändern?): Änderungen Gewicht „Motor“ inkl. Abgasnachbehandlung als zertifiziertes System:	

Änderungen Bauraum / Volumen / Abmessungen „Motor“ inkl. Abgasnachbehandlung als zertifiziertes System:

Restriktionen für Einbau „Motor“ inkl. Abgasnachbehandlung als zertifiziertes System:

Bestehen Unterschiede hinsichtlich der Motoren (inkl. Peripherie und emissionsmindernde Einrichtungen) für den Einbau und Einsatz im Oberwagen für den Kranbetrieb und Unterwagen / Fahrgestell für den Fahrbetrieb? (Stichwort: DPF aktiv / passiv):

5	Kosten der Emissionsstufe V

Welche Preisdifferenz in € je Einheit (Mehrkosten) besteht zwischen den Motoren der Stufe IV und der Stufe V für folgende Leistungsklassen:

Diese Daten werden benötigt, um die Kosten, die sich beim Motorhersteller für die Umstellung der Abgasstufe IV auf V ergeben, abschätzen zu können (in Anlehnung an Impact Assessment der Europäischen Kommission SWD (2014) 282).

ca. 129 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 155 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 185 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 205 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 250 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 300 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

ca. 385 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV

	ca. 435 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV ca. 500 kW _____ € Preisdifferenz / Mehrkosten für Stufe V im Vergleich zu Stufe IV	
C	**Weitere Aspekte**	
	6	Um wie viel Prozent steigt der Kraftstoffverbrauch von Motoren der Stufe V (für z. B. DPF) im Vergleich zur Stufe IV?
	7	Verschlechtert sich das Abgasemissionsverhalten in Abhängigkeit der Abgasgrenzwerte der unterschiedlichen Stufen (97/68/EG) hinsichtlich PM und NO_x während der Lebensdauer des Motors signifikant (Stichwort: Verschlechterungsfaktor)?
	Falls ja, welche Faktoren für die jährliche Verschlechterung können entsprechend den Abgasemissionsstufen angesetzt werden für Stufe I bis Stufe V? Stufe I: _____; Stufe II: _____; Stufe III A: _____; Stufe III B: _____; Stufe IV: _____; Stufe V: _____;	
	8	Wie viele Motoren liefern Sie jährlich an Hersteller von Fahrzeugkranen und im speziellen von AT-Kranen in Europa, im Verhältnis zu Ihrer gesamten Produktion von Dieselmotoren? Anteil in % für Fahrzeugkrane: Anteil in % für AT-Krane:

Anhang H Fragebogen zur Datenaufnahme bei Fahrzeugkranherstellern

Inhalt	
A	**EU Mobilkranindustrie und globaler Markt** Um das Verständnis über die Auswirkungen auf die Konstruktion von Mobilkranen bei Änderungen des Motors zu erhöhen, sollen in der Studie Funktion, Aufbau und Einsatzgebiete von Mobilkranen erläutert werden sowie die Vielfalt an unterschiedlichen Typen und Rüstzuständen dargestellt werden. Zuerst soll ein Überblick über die EU Mobilkranindustrie (ökonomische Daten) gegeben werden und der Mobilkran in seiner Funktion und Variation (in Kombination mit Motor) dargestellt werden. Im Anschluss werden der globale Markt für Mobilkrane sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die Hersteller aufgezeigt. Zuletzt werden alle Aspekte der zeitlichen Planung der Umsetzung aller Stufen der Richtlinie 97/68/EC aufgezeigt (Motor 129-560 kW und Maschine).
	Ökonomische Daten zur Vorstellung der Branche: 1) Wie hoch ist der Anteil an AT-Kranen im Verhältnis zu anderen Fahrzeugkranbauformen (Geländekran, Raupenkran, Autokran) in Ihrem Unternehmen? 2) Wie hoch ist der Weltmarktanteil ihres Unternehmens bei Fahrzeugkranen? 3) Wie hoch ist der Umsatz der Sparte Fahrzeugkrane und wie hat sich dieser entwickelt? (Umsatz in Mio. € und % für 2011, 2012, 2013) 4) Wie hoch ist die FuE-Aufwandsquote (Anteil Ausgaben für FuE im Verhältnis zum Umsatz) in der Sparte Fahrzeugkrane? 5) Wie hoch ist die Beschäftigtenanzahl in der Produktgruppe Fahrzeugkrane in Ihrem Unternehmen? 6) Wie viele unterschiedliche Krantypen umfasst Ihr Produktspektrum (davon wie viele Typen AT-Krane)? **Technische Daten zum Verständnis des Aufbaus, der Funktion und des Einsatzprofiles:** 7) Was sind die typischen Einsatzgebiete und Funktionen von AT-Kranen (wann, wo, wofür, wielange)? 8) Welcher Krantyp ist besonders repräsentativ für die Darstellung der im Zuge der Abgasgesetzgebung notwendig gewordenen konstruktiven Änderungen

	am Kran? Es sollte ein Beispiel aufgegriffen werden und mit Bildern und Zeichnungen verdeutlicht werden (insbesondere Einbauraum Motor am Unter- und Oberwagen). Dieses Beispiel wird zur Darstellung der Auswirkungen (auf andere Baugruppen, Anschlüsse, Kabelbaum etc.) bei Änderungen der Motoren und des Abgasnachbehandlungssystems aufgegriffen (Bewertung der Auswirkungen der Umstellungen von Stufen IIIA auf IIIB und IIIB auf IV). 9) Welche Vorgaben / (EU-) Richtlinien sind weiterhin bei Änderungen am Kran (bedingt durch neuen Motor) zu beachten, wie Straßenzulassung, Sicherheit etc.? 10) Welche Änderungen ergaben sich an den Motoren und dem Abgasnachbehandlungssystem der Stufe I, II, IIIA, IIIB und IV (Bilder zum Verdeutlichen der Änderungen und Ausmaße vorhanden?) **Marktwirtschaftliche Daten:** 11) Investitionsvolumen für AT-Krane (ca. zwischen 300.000 und 20 Mio €)? 12) Wie viele und welche Krantypen wurden 2011, 2012 und 2013 ausgeliefert (gegliedert in EU und Rest)? 13) Welche Unterschiede bestehen für den Verkauf zwischen regulierten und nicht-regulierten Märkten? Wo liegen die Hindernisse und wo bestehen welche Hemmnisse / Marktbarrieren? a. Politisch / Rechtlich hinsichtlich Gesetzen und Richtlinien b. Technisch (Verfügbarkeit schwefelarmer Kraftstoff, AdBlue,…) 14) Wie hoch ist das Umsatzvolumen bzw. der Anteil des Gebrauchtkrangeschäfts für EU und Rest (im Vergleich zu neuen Krane)? 15) Zur Darstellung der internationalen (Gebraucht-) Kranbewegungen: a. Werden Gebrauchtkrane nach Verkauf in Nicht-EU-Länder auch wieder in die EU eingeführt und welche Hemmnisse sind hier durch die Gesetzgebung zu erwarten? b. Welche Hindernisse bestehen für den Einsatz (nicht Verkauf) von Kranen auf unterschiedlichen Kontinenten, vor allem bei Großgeräten. 16) Wie ist der Restwert von AT-Kranen im Lebenszyklus und wie verändert sich dieser bei Wiedereinfuhr in die EU / bei Erfüllung der aktuell geltenden politischen Reglementierungen des Einfuhrlandes? Welche Auswirkungen ergeben sich dadurch auf das Gesamtgeschäft?
B	**Abgasemissionsinventar mobiler Krane in der EU** Um die Umweltaspekte (NO_x und PM) von mobilen Kranen mit unterschiedlichen Abgasemissionsstufen der Motoren aufzuzeigen, werden die Abgasemissionen für den Bestand von AT-Kranen berechnet und ins Verhältnis zu Baumaschinen und der gesamten NRMM in Europa gesetzt. Betrachtet werden Stufe I bis IV für Off-road und zusätzlich mit On-road verglichen. Weiterhin werden Szenarien berechnet, wie sich die Abgasemissionen bei Einführung von Stufe V bei einem Be-

	trachtungszeitraum von fünf Jahren entwickeln, mit einem Umsetzungszeitraum von einem Jahr bzw. drei Jahren. Auch werden die Kosten in € je eingespartem kg PM der Stufen I bis IV berechnet und für Stufe V hochgerechnet / geschätzt.
	17) Wie hoch schätzen Sie den Bestand (Population) ihrer AT-Krane in der EU? 18) Zur Abschätzung der Höhe der Umweltaspekte wird eine Abschätzung der Altersstruktur der Kranpopulation benötigt. Schätzen Sie den prozentualen Anteil der Krane bspw. unter 5 Jahre, von 5 bis 10 Jahren, usw. 19) Wie hoch sind die durchschnittlichen Betriebsstunden, getrennt nach Ober- und Unterwagen und nach Krangröße bzw. Traglast (falls entscheidend)? Variieren die Betriebsstunden altersabhängig, bzw. sind diese bei älteren Maschinen signifikant geringer? 20) Was sind die durchschnittlichen Lastfaktoren für Ober- und Unterwagen nach Krangröße? 21) Wie hoch ist das Wachstum am Bestand von AT-Kranen in der EU? 22) Wie hoch ist die durchschnittliche Lebensdauer von AT-Kranen bzw. wie hoch ist der Abgang im EU Bestand im Verhältnis zum Zugang?
C	**Bewertung der Auswirkungen der Umstellungen von Stufen IIIA auf IIIB und IIIB auf IV** Die Auswirkungen der Umstellungen der Motoren von Stufen IIIA auf IIIB und IIIB auf IV auf den AT-Kran werden aufgezeigt. Dabei soll der Aufwand für Änderungen von betroffenen Baugruppen bei Änderungen am Motor (Größe, Anschlüssen, Abgasnachbehandlungssysteme, Kühlsystem) in der / im Entwicklung, Konstruktion, Versuch, Zulassung, Produktionsplanung etc. aufgezeigt werden. Zusätzlich sollen die Kosten für diesen Aufwand und die Auslastung der Ressourcen wie Belegschaft, die mit der Umstellung beschäftigt ist, je Fachabteilung, Produktionskapazität, Versuchsflächen, Kapital (Lagerkosten, gebunden Kosten) dargestellt werden. Weiterhin werden die zeitlichen Aspekte betrachtet, d. h. welche und wie viele Krantypen in welchem Zeitraum umgestellt wurden (Abgleich mit der Initialplanung der Richtlinie und Einfluss Flexibilisierungssystem und sell-off stock).
	Technische Aspekte der Umstellungen: 23) Welche technischen Konsequenzen für den AT-Kran haben sich durch Änderungen der Abgasgrenzwerte ergeben (re-space / weight / CoG / cooling system / add blue / availability of fuel and additive etc.)? Detaillierte Beschreibung / Visualisierung der betroffenen Baugruppen anhand von Bildern und Zeichnungen an einem Beispiel für komplette Überarbeitung (hierfür sollte das Beispiel aus A.8 wieder aufgegriffen werden).

Zeitliche Aspekte der Umstellungen:

24) Wie lange hat die Umstellung der Krantypen für die jeweiligen Stufen gedauert? (Vergleich der Initialplanung mit der tatsächlichen Umsetzung)
25) Wie viele Typen konnten in welchem Zeitraum umgestellt werden? Welchen zeitlichen Einfluss hatten „unfertige“ Motoren, bzw. geänderte Prototypen?
26) Wann waren neue Motoren (im Vergleich zur Initialplanung) verfügbar und waren diese technisch ausgereift?
27) Wo und wann sind bzw. waren AT-Krane auf Grund von Problemen in Verbindung mit dem Motor nicht verfügbar?

Markt und wirtschaftliche Auswirkungen der Umstellungen:

28) Welcher Aufwand (durchzuführende technische Änderungen, eingebundene Fachabteilungen und der personelle Aufwand in Personentagen zu welchem Kostensatz) ergab sich durch Änderungen am Kran auf Grund von „unfertigen“ Motoren? (Re-design of the cranes according to unfinished engine designs, changes of prototype engines or pre-series and series models).
29) Welcher Aufwand ergab sich für die Änderungen am Kran je Typ insgesamt?
    a. Aufwand der eingebundenen Fachabteilungen (Entwicklung, Konstruktion, Versuch, Zulassung, Produktionsplanung, Produktionshochlauf, Produktion etc.) in Stunden mit entsprechenden Kostensätzen,
    b. Auslastung der Ressourcen Belegschaft, die mit der Umstellung beschäftigt ist / war je Fachabteilung (Anzahl Mitarbeiter für die Umstellung im Verhältnis zu gesamten Mitarbeiter der Fachabteilung) in den einzelnen Phasen der Umstellung,
    c. Auslastung der Versuchs- und Produktionsflächen, Produktionskapazität,
    d. Lagerkosten und gebundenes Kapital für vorgekaufte Motoren und
    e. Jeglicher weitere Aufwand und die Auswirkungen in Verbindung mit der Motorenänderungen, wie Qualitätsprobleme (Nachbearbeitungszeit im Vergleich zur Produktionszeit), Sicherheitsaspekte auf Grund von limitierten Versuchszeiten, Ersatzteile und deren Verfügbarkeit etc.
30) Welche Marktauswirkungen ergeben sich durch die Änderungen für die Maschinenhersteller (qualitative Aussagen zur Innovationsfähigkeit, Wettbewerbsfähigkeit global, etc.)
31) Welche Auswirkungen ergeben sich für die Anwender. Qualitative Aussagen zu Auswirkungen auf Investitionstätigkeit (Planungs- und Investitionssicherheit), Versorgung / Austausch Ersatzteile; nicht Verfügbarkeit von Kranen etc. auf Grund von Motoraspekten?

D **Schätzung der Auswirkungen der Umstellung von Stufen IV auf V**

Auf Grundlage des Ist-Standes und der gemachten Erfahrungen sollen analog zu

Bereich C des Interviewleitfadens die

- technischen Auswirkungen / Änderungen (Rücksprache mit Motorhersteller),
- zeitlichen Auswirkungen (wie viel Zeit wird voraussichtlich die Umstellung aller Krantypen in Anspruch nehmen und wie hoch ist die Ressourcenauslastung hinsichtlich Personal) und
- wirtschaftlichen Auswirkungen (Kosten für Aufwand und neue Technik - Markt: Verfügbarkeit von Kranen und Umsatzausfälle – EU-Gesellschaft: Verlust von Arbeitsplätzen, Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft) prognostiziert werden.

Es soll insbesondere aufgezeigt werden, dass eine Umstellung, wie sie aktuell in Planung ist, technisch nicht möglich bzw. realisierbar ist, da die getroffenen Annahmen für Mobilkrane nicht zutreffend sind.

32) Schätzen Sie die Markt- und wirtschaftlichen Auswirkungen bei einem Umstellungszeitraum von einem Jahr (12 Monate Übergangszeit für Produktionsanlauf und –hochlauf mit Stufe V Motoren, entsprechend dem Proposal Implementation of Stage V 97/68/EC für 130 – 560 kW Motoren) für den Betrachtungszeitraum von fünf Jahren.

    Prognostizieren Sie den Umstellungsplan für die Übergangsphase mit Abschätzung des Ablaufs der Umstellung (erstes Jahr):

    a. Welche Typen können in diesem Zeitraum umgestellt werden?
    b. In welcher Anzahl werden diese Typen verkauft bzw. wie hoch wäre hier der Umsatz bzw. wie hoch wäre hier der Verlust an Umsatz durch fehlende Absätze?
    c. Welche Auswirkungen ergeben sich dadurch (Umsatzausfall) auf die Belegschaft bzw. wie viele Stellen müssten abgebaut werden?
    d. Skizzieren Sie den weiteren Verlauf der Umstellung für die weiteren vier Jahre analog den Aspekten a. bis c.

33) Schätzen Sie den Aufwand für die Änderungen von Stufe IV auf V anhand der Fragen 29 a. bis e. (technische Auswirkungen nach Rücksprache mit Motorhersteller bzgl. Änderungen am Motor)

34) Welche negativen Auswirkungen könnten durch eine Umsetzung von drei Jahren aufgefangen werden (36 Monate Übergangszeit für Produktionsanlauf und -hochlauf mit Stufe V Motoren)?

Notwendige Unterlagen (vorab zusammenstellen)

Nr		Termin	zuständig
1	**Weltmarktdaten für 2011, 2012, 2013:** Abgeleitete EU-Daten (was wurde in der EU in den Verkehr		

	gebracht?)		
2	**Lieferprogramm für 2011, 2012, 2013 Welt / EU** Jeweils auf Typen bezogen (Stückzahl pro Krantyp)		
3	**Terminplan, Gesamtdauer Umstellung IIIA auf III B und III B auf IV:** Zeitplan für die Umstellungen, am besten in tabellarischer Form mit betriebenem Aufwand, um den zeitlichen Ablauf der Umstellungen je Krantyp bei den Herstellern darstellen zu können mit Personentagen je Fachabteilung und Kostensatz - (Ressourcenbindung und -intensität von Personal, Fläche, Kapital: Kapazitätsauslastung Entwicklung, Konstruktion, Versuch, Homologation, Produktion)		
4	**Bilder, Fotos, 3D-Darstellungen Kran und Motor:** Zur Visualisierung von Aufbau und Funktion Kran und welche Baugruppen am Kran durch Änderungen am Motor betroffen → ein Beispiel aussuchen und erläutern / darstellen		
5	**Übersicht technische Daten aller Krantypen sofern nicht im Lieferprogramm enthalten** Traglasten, Anzahl Motoren und Leistungsklassen		