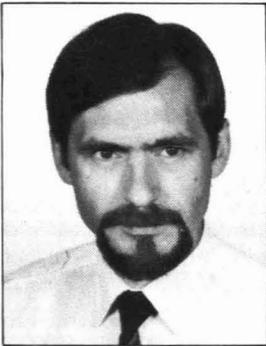




Die Absenkung der Kraftfahrzeug-Emissionen Technik — Aufwand — Nutzen



Wolfgang BERG, Dr.-Ing., Hauptabteilungsleiter des Bereiches Abgaszulassung und Behörden bei der Daimler-Benz in Stuttgart/Untertürkheim.

1966/67 Diplomarbeit bei Daimler-Benz A.G. in Stuttgart über Abgasemissionen von Benzin-Einspritzmotoren. August 1967 Eintritt in den Motorenversuch der Daimler-Benz A.G. als Sachbearbeiter für die Entwicklung von Abgasreinigungssystemen an Pkw-Einspritzmotoren. Ab 1973 Übernahme der Pkw-Zertifizierungsaktivitäten der Daimler-Benz A.G. für alle Länder mit Abgasgesetzgebungen. Parallel zu den weltweiten Pkw-Zulassungsarbeiten befaßt mit der Wahrnehmung aller zum Abgasthema gehörenden Behördenkontakte in den jeweils betroffenen Ländern.

Technik kann — wenn man ihre gesamte Problematik erfassen will — nicht losgelöst von wirtschaftlichen Bezügen betrachtet werden. Daher ist es durchaus angebracht, das Thema Abgas-Reinigung an Pkw unter den Aspekten von Technik, Aufwand und Nutzen zu betrachten. Die Thematik der Abgasreinigung, die hier repräsentativ auch für andere Umweltschutzbemühungen steht, ist ein gutes Beispiel, die Möglichkeiten und Grenzen von Kosten/Nutzen-Überlegungen aufzuzeigen. Hinweis: Der Beitrag erscheint im Rahmen der redaktionellen Kooperation mit dem Verband Deutscher Wirtschaftsingenieure (VDI).

Die Technik

Die Bemühungen des Automobilherstellers zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes an Kraftfahrzeugen konzentrieren sich auf Emissionen aus dem Kurbelgehäuse, dem Kraftstoffsystem und dem Auspuff.

Die Emissionen aus dem Kurbelgehäuse wurden dadurch eliminiert, daß man die früher in die Atmosphäre austretenden Kurbelgehäuse-Entlüftungsgase in das Ansaugsystem des Motors und damit in den Verbrennungsprozeß zurückführte.

Mit diesem technologischen Schritt wurde erst vor ca. 20 Jahren ein Beitrag zur Verringerung des Schadstoffausstoßes des Motors geleistet.

Die Entwicklung dieser so einfach erscheinenden Anlagen war mit vielen Schwierigkeiten verbunden, da die rückgeführten Gase, wegen ihrer mit dem Betriebszustand des Motors variierenden Menge, bei der konstruktiven Auslegung z.B. des Vergasers nicht berücksichtigt werden konnten. Dadurch wurde im späteren Betrieb oft die gesamte Gemischanpassung durcheinander gebracht mit allen daraus resultierenden Konsequenzen für die Funktionstüchtigkeit des Motors.

Die Kurbelgehäuseentlüftung hat erst in jüngster Zeit wieder Aktualität er-

langt, und zwar im Zusammenhang mit dem Einsatz der Abgasrückführung zur NOx-Vermeidung am Diesel-Motor. Ich werde diese Problematik bei der Behandlung der Abgasrückführungstechnologie später erläutern.

Verdunstungsemissionen stammen aus dem Kraftstoffsystem, und zwar aus dem Vergaser und dem Kraftstofftank.

Durch Abdichtungsmaßnahmen an Wellen und Schrauben sowie durch Umstellung der Schwimmerkammerbelüftung auf Innenbelüftung konnte die Emissionsquelle Vergaser ausgeschaltet werden.

Die Beseitigung der Verdunstungsverluste aus dem Kraftstofftank war dagegen schon ein schwieriges Problem. Zunächst entwickelte man Systeme, bei denen der abgedichtete Tank mit dem Motorkurbelgehäuse verbunden wurde, um Verdunstungsgase dort durch Kondensation einzulagern. Beim Fahrbetrieb sollten diese Gase dann über die Kurbelgehäuseentlüftung in den Verbrennungsprozeß eingespeist werden.

Die Speicherkapazität des Kurbelgehäuses war jedoch nicht in jedem Fall ausreichend, so daß die auch auf diesem Gebiet weiter verschärfte Gesetzgebung bald nicht mehr erfüllt werden konnte. Deshalb speichert man heute

die Tankverdunstungsgase in einem Aktivkohlekanister. Im Fahrbetrieb des Motors werden die gespeicherten Gase über ein Steuerungssystem abgesaugt und mitverbrannt.

Kurbelgehäuse und Kraftstoffsystem waren übrigens nur ein Problem bei Fahrzeugen mit Otto-Motor. Fahrzeuge mit Diesel-Motor haben zwar auch Kurbelgehäuseentlüftungsgase, diese sind aber weniger schadstoffbelastet als beim Otto-Motor. Der Otto-Motor verdichtet ein Kraftstoff/Luft-Gemisch, von dem an den Kolbenringen vorbei Teile ins Kurbelgehäuse gelangen, der Diesel-Motor verdichtet dagegen reine Luft.

Verdunstungsemissionen aus dem Kraftstoffsystem entfallen aufgrund der geringen Flüchtigkeit des Diesel-Kraftstoffes nahezu völlig, so daß diese Fahrzeuge auch keine entsprechenden Gegenmaßnahmen erforderlich machen.

Auspuff

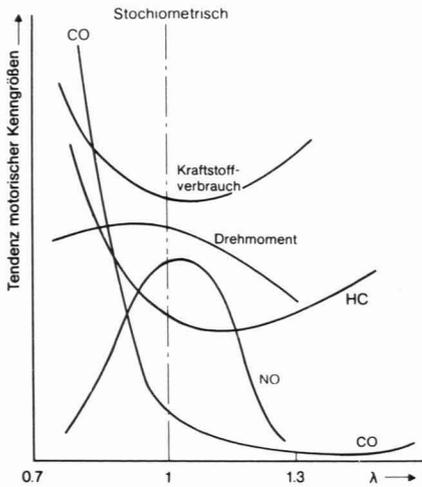
Kommen wir nun zu den Emissionen aus dem Fahrzeugauspuff. Hier handelt es sich bei Otto- und Diesel-Motor um folgende Komponenten

— unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)

— Stickoxide (NOx)

— Feststoffe (PM = Particulate Matter).

Mit Feststoffen sind i.W. Rußemissionen beim Diesel-Motor gemeint. Feststoff-Grenzwerte für PKW mit Otto-Motoren existieren nicht, obwohl auch Otto-Motoren, die mit verbleiten Kraftstoffen betrieben werden, Feststoffe (Bleipartikeln) emittieren.



Typische Abhängigkeit von Drehmoment, Kraftstoffverbrauch und Emissionen vom Luftverhältnis λ . [2].
Forschung und Entwicklung VIMA 1983-11/17-08

Abb. 1

Anhand der in Bild 1 für einen PKW mit Otto-Motor dargestellten grundsätzlichen Zusammenhänge werden die Bereiche der Entstehung dieser Emissionen verständlich.

Emissionen von Kohlenmonoxid werden gemäß Bild 1 hauptsächlich durch Abmagerungsmaßnahmen verringert, die sowohl im Leerlauf wie im gesamten Motorkennfeld ansetzen müssen. Die Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe, d.h. Kraftstoffreste, lassen sich i.W. ebenfalls durch Abmagerung reduzieren.

Zum mageren Bereich wird jedoch bald eine Grenze erreicht, wo Entflammungsaussetzer und die damit auftretende unvollständige Verbrennung ein Wiederansteigen der HC-Emissionen bewirken.

Da HC-Emissionen also das Produkt unvollständiger Verbrennung sind, wie sie in Toträumen des Brennraumes oder beim Erlöschen der Flamme in der Nähe kalter Zylinderwandungen auftritt, zielen Abgasreinigungsmaßnahmen beim HC darauf hin, gute Verbrennung einzuleiten und aufrecht zu erhalten. Entsprechende Maßnahmen, die z.T. gleichzeitig günstig hinsichtlich CO-Absenkung wirken, sind beim Otto-Motor z.B.

- Schubabschaltung
- Drosselklappenschließdämpfer und
- Gemischvorwärmung bzw. Saugrohrbeheizung

Beim Diesel-Motor, der aufgrund seines ständigen Betriebes mit Luftüberschuß keine nennenswerten CO-Emissionen aufweist, können auch die im Vergleich zum Otto-Motor wesentlich geringeren HC-Emissionen noch einmal deutlich gesenkt werden. Hierzu gilt es, Nachspritzer an den Einspritzdüsen zu vermeiden. Durch das Schließen der Einspritzdüse entsteht eine Druckwelle in der Einspritzleitung. Diese läuft zur Einspritzpumpe zurück, wird dort reflektiert, läuft wieder vor zur Einspritzdüse und öffnet diese noch einmal ein wenig zu einem nicht vorgesehenen Zeitpunkt. Durch Einbau eines Dämpfungsventils in die Einspritzpumpe kann die Wellenreflexion und die damit verbundene HC-Emission vermieden werden. Dieses ist praktisch die einzige am PKW-Diesel-Motor erforderliche Maßnahme, um die HC-Emissionen unter das derzeit welt-schärfste Grenzwert-Niveau für diesen Schadstoff zu bringen.

Bei den Stickoxiden werden Gegenmaßnahmen jedoch komplizierter, da — wie Bild 1 zeigt — die Tendenz gegenläufig zum CO- und HC-Verlauf ist. Dies ist verständlich, weil mit besser werdender Verbrennung (d.h. sinkendem HC und CO) die Verbrennungsspitzen-temperatur und damit die NOx-Bildung zunimmt. Beim Otto-Motor wurden zur NOx-Verminderung i.W.

- Spätzündung
- Abmagerung und
- Abgasrückführung untersucht.

»Selbst wenn es gelänge, das wirtschaftliche Optimum für den Aufwand zur Luftreinhaltung zu ermitteln, wäre noch keine Aussage darüber möglich, ob dieses ökonomische Optimum auch das ökologisch Wünschenswerte erreicht.«

Spätzündung bewirkt ein Verschleppen der Energieumsetzung hinter das Auslaßventil, d.h. eine Verschlechterung der Energieausbeute im Brennraum und damit eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs. Abmagerungsmaßnahmen finden ihre Grenze im Auftreten der schon genannten Entflammungsaussetzer, durch die die HC-Emissionen ansteigen.

Damit bleibt als einzige konventionelle Maßnahme die Abgasrückführung. Die rückgeführten Abgase wirken als

inertes Gas, das an der Verbrennung nicht teilnimmt und senken damit die Verbrennungsspitzen-temperatur ab, was zur Verringerung der NOx-Bildung führt. Viele Jahre Entwicklungsarbeit waren erforderlich, um die in diesem System verwendeten sog. Abgasrückführungsventile standfest, d.h.i.W. temperaturfest und verschmutzungsempfindlich zu machen.

Beim Diesel-Motor sind Veränderungen am Brennverfahren, Veränderungen am Einspritzverfahren und Abgasrückführung Methoden, die heute und auch künftig zur Herabsetzung der NOx- und Feststoffemissionen eingesetzt werden. Die Abgasrückführung ist hierbei keine einfach zu handhabende Maßnahme. Sie stellt in Verbindung mit der zur Vermeidung von Emissionen aus dem Kurbelgehäuse eingesetzten geschlossenen Kurbelgehäuse-Entlüftung ein erhebliches Problem für die Dauerhaltbarkeit des Motors dar. Mit den Kurbelgehäuse-Entlüftungsgasen werden ölhaltige Dämpfe zusammen mit feststoffhaltigen Gasen aus der Abgasrückführung dem Motor zur Verbrennung zugeführt. Hohe Verschmutzung, z.B. von Einlaßkanal, Einlaßventil und dem Bereich hinter dem obersten Kolbenring, sowie erhöhter Verschleiß der Motoren durch Ölverschmutzung sind die Folge.

Zur besonderen Problematik wird die Abgasrückführung am Diesel-Motor mit Turbolader. Schon beim Saugmotor ist durch die Abgasrückführung das Übergangsverhalten beim instationären Fahrbetrieb kritisch. Beim plötzlichen Beschleunigen wird eine erhöhte Kraftstoffmasse eingespritzt. Gleichzeitig ist im Saugrohr aber noch das aus der Abgasrückführung stammende Abgas vorgelagert und gelangt mit der Ansaugluft in die Brennkammer. Erhöhte Einspritzmenge und abgasvermischte Luft bewirken, daß die zu rauchfreier Verbrennung erforderliche Luftzahl nicht mehr eingehalten wird. Rauchemissionen sind die Folge. Beim aufgeladenen Motor treten zusätzlich Verschmutzungsprobleme des Laders auf, und die mit recht hoher Temperatur rückgeführten Abgase wirken der mittels des Laders beabsichtigten Luftmassenerhöhung pro Verbrennungstakt entgegen.

Gravierender aber ist das durch die Abgasrückführung bei Beschleunigungsvorgängen entstehende Pro-



blem. Bei einer Beschleunigung aus dem Leerlauf heraus (Abgasrückführung maximal!) erhöht sich die Abgasmenge hinter dem Auslaßventil. Die Turbine reagiert jedoch wegen ihrer Masse nur verzögert auf diesen plötzlich auftretenden erhöhten Abgasmassenstrom, was zu einer Gegendruckerhöhung vor der Turbine führt. Diese Druckerhöhung zwingt eine (ungewollte) zusätzliche Abgasmasse zurück durch das nicht in der theoretisch idealen Zeit schließende Abgasrückführungsventil (Ventilkolben-Massen-Trägheit). Da nun der Kompressor mit der Turbinenwelle fest verbunden ist, beschleunigt er ebenfalls nur verzögert, und der Ladedruckaufbau erfolgt nicht so schnell wie benötigt.

Dadurch verursacht der Zylinder einen Saugeffekt, der die durch das nicht schnell genug schließende Abgasrückführungsventil (in Unterstützung zu der zuvor beschriebenen Druckerhöhungstendenz von der Turbinenseite her) unbeabsichtigt rückgeführte Abgasmasse erhöht.

Diese Zusammenhänge führen zu einer Erhöhung der Partikel-, d.h. Rußemission, die sich um so gravierender auswirkt, je öfter Beschleunigungen aus dem Leerlauf heraus erfolgen.

Katalysator-Technologie

Zweifellos handelt es sich bei der Katalysator-Technologie um die derzeit wirkungsvollste Abgasreinigungstechnologie für den Otto-Motor. Derartige Anlagen wurden erstmals 1974 in den USA als sog. Oxidations-Katalysatoren eingesetzt, die HC- und CO-Emissionen nahezu eliminierten.

Ab etwa 1980 wurde in den USA der sog. Dreiwegkatalysator eingesetzt, der außer HC und CO auch die NO_x-Emissionen drastisch verringert. Sein Einsatz ist jedoch nur in Verbindung mit einem geschlossenen Regelkreis sinnvoll, da ständig ein eng um den stöchiometrischen Betriebspunkt ($\lambda = 1$) pendelndes Kraftstoff/Luft-Verhältnis eingeregelt werden muß. Die hierfür erforderliche Regelfunktion übernimmt die Sauerstoff- oder auch λ -Sonde. Diese mißt den Restsauerstoff-Gehalt im Abgas und regelt die Kraftstoffzuleitung stets so, daß der gewünschte Betriebspunkt bei $\lambda = 1$ hergestellt wird. Der Einsatz des Katalysators und der Sauerstoffsonde setzen jedoch die An-

wendung unverbleiten Kraftstoffes voraus. Wird der Katalysator (versehentlich oder willentlich) mit verbleitem Kraftstoff betrieben, erhöhen sich die Emissionen schon nach kurzer Laufstrecke sehr stark.

Bezüglich der Frage des Katalysatorreinsatzes beim Diesel-Motor ist folgendes festzuhalten:

Ein Reduktionskatalysator zur Absenkung der NO_x-Emissionen würde bei dem ständig mit Luftüberschuß, d.h. in oxidierender Abgasatmosphäre betriebenen Diesel-Motor nicht wirken. Andererseits ist ein Oxidations-Katalysator, der die Herabsetzung von Co und HC bewirken würde, bei den geringen Emissionen dieser Schadstoffe am Diesel-Motor nicht erforderlich. Der heutige PKW-Diesel-Motor kann die schärfsten HC- und CO-Standards der Welt (US-49-Staaten-Grenzwerte) ohne Abgasnachbehandlung erreichen.

Aufwand

Der Gesamtaufwand für die Abgasreinigung beeinflusst den Preis des Produktes, damit seine Verkaufsfähigkeit und schließlich die Wettbewerbsfähigkeit des betreffenden Automobilherstellers entscheidend. Die zuvor dargestellte Erforschung von Techniken und Technologien und deren Entwicklung zur Serienreife mit anschließender Produktion sind nur ein Teil des Gesamtaufwandes.

Die zwei weiteren wesentlichen Bereiche umfassen einerseits alle Arbeiten,

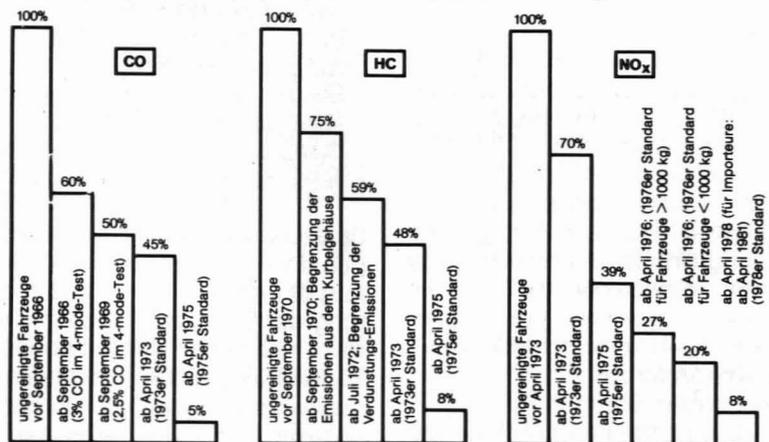
die zur gesetzeskonformen Zulassung oder Zertifizierung dieser Systeme gehören, d.h. den Zeitraum vor der Produktion umfassen. Andererseits sind diejenigen Arbeiten zu berücksichtigen, die sich auf die Betreuung der Systeme im praktischen Feldeinsatz, d.h. auf den Zeitraum nach der Produktion, beziehen.

Nutzen

In den Ländern mit sog. »Abgasgesetzgebung« ist es üblich, die erwarteten Verbesserungen der Emissionssituation aufgrund der Absenkungsstufen der gesetzlichen Vorschriften zu prognostizieren. Bild 2 zeigt eine solche Prognose für Japan.

Bild 3 zeigt die aus den gesetzlichen Grenzwerten und ihren Absenkungsstufen seit 1970 errechneten Emissionsverbesserungen für die Bundesrepublik Deutschland. Aber derartige Darstellungen sagen nichts über den tatsächlich erreichten Nutzen, d.h. die reale Verbesserung der Immissionssituation durch die gesetzlichen Grenzwerte bzw. die daraufhin eingesetzten Technologien, aus. Der Einfluß auf den realen Nutzen von Gesetzen und den daraus resultierenden Maßnahmen zur Emissionsverbesserung kann nur dann abgeschätzt werden, wenn das Verhalten der entwickelten, zertifizierten und produzierten Systeme im praktischen Feldeinsatz bekannt ist.

Eine Auswertung amerikanischer Feldduntersuchungen führte zu der in Bild 4 gezeigten Darstellung. Man sieht, daß sich durch die Einführung der Katalysatortechnologie die Emissions-



Absenkungsstufen der Emissionsgrenzwerte für PKW mit Otto-Motoren durch den Einsatz der verschiedenen Grenzwertstufen in Japan, [2].

Forschung und Entwicklung VIMA 1983-11/17-27

Abb. 2

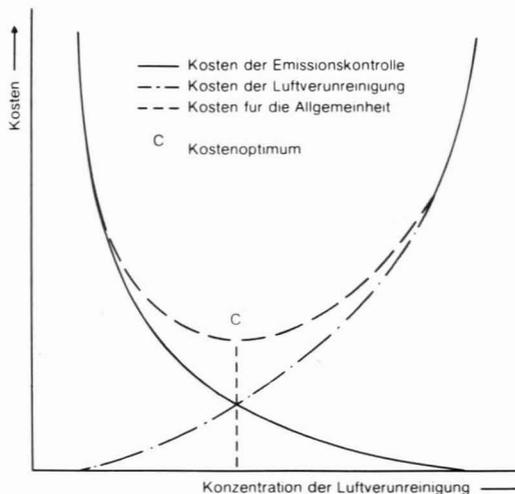


spiel die menschliche Gesundheit sei. Bild 7 verdeutlicht, daß es die menschliche Gesundheit nicht gibt, sondern daß eine Vielzahl unterschiedlicher Empfindlichkeiten in einer Bevölkerung vorliegt. An welcher Gruppe sollen sich nun gesetzliche Luftqualitätsstandards orientieren, die schlußendlich zur Herleitung von Emissionsgrenzwerten als Basis dienen müßten?

Eine Nutzenquantifizierung, ja selbst die Definition des Nutzens ist deshalb sehr schwierig. Eine Alternative aus diesem Dilemma ist die Anwendung des Vorsorgeprinzips, das auch Grundlage der Luftreinhaltepolitik der Bundesregierung ist. Man verzichtet hierbei angesichts der zuvor genannten Schwierigkeiten auf den Versuch, Maßnahmen zum Umweltschutz erst nach Bekanntwerden der Ergebnisse von Wirkungsforschungsprogrammen zu veranlassen, sondern fordert den Einsatz der jeweils besten verfügbaren Gegenmaßnahmen. Vor diesem Hintergrund kann auch die jüngste Entscheidung der Bundesregierung verstanden werden, Emissionsgrenzwerte für PKW mit Otto-Motoren vorzuschreiben, die das Potential der derzeit wirkungsvollsten Abgasreinigungstechnologie ausschöpfen sollen und damit den Einsatz des Dreiwegkatalysatorsystems bewirken werden.

Die deutsche Automobilindustrie hat sich bereit erklärt, diesen Weg mitzugehen, obwohl der in der Öffentlichkeit erwartete Nutzen dieser teuer zu bezahlenden Maßnahme mit Sicherheit nicht sofort spürbar werden wird. Ein Erfolg dieser Technologie, d.h. eine deutliche Verringerung der durch Luftverunreinigung verursachten Wirkungen, kann nur erwartet werden, wenn ihre Funktionstüchtigkeit im praktischen Feldeinsatz gewährleistet ist und wenn ihre Anwendung oder die Anwendung einer äquivalenten Maßnahme europaweit erfolgt.

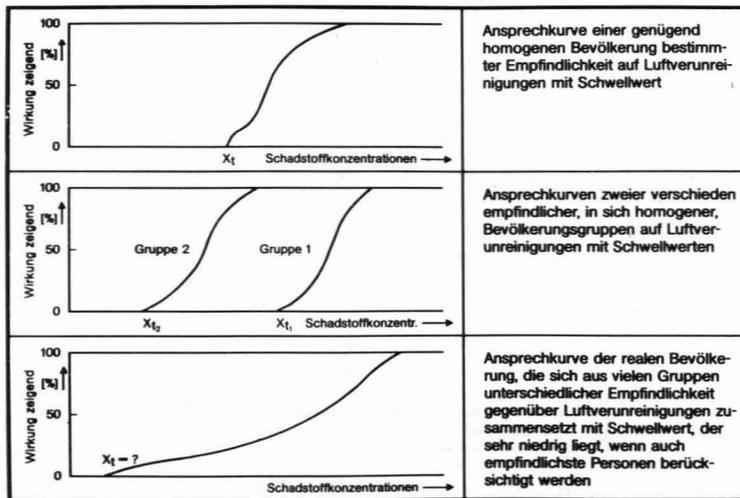
National begrenzte Maßnahmen können das angestrebte Ziel einer allgemeinen Umwelt- und Luftverbesserung nicht erreichen. Sie bergen dagegen die Gefahr von Konflikten auf rechtlichem, wirtschaftlichem sowie wirtschafts- und handelspolitischem Gebiet.



Kostenverlauf in Abhängigkeit vom Aufwand für die Abgasreinigung oder dem Grad der Luftverunreinigung mit Kostenoptimum, [2].

Forschung und Entwicklung
V1MA
1983-11/17-32

Abb. 6



Darstellung von Ansprechkurven („response curves“) verschiedener Bevölkerungsgruppen auf Luftverunreinigungen mit zugehörigen Schwellwerten, [2].

Forschung und Entwicklung
V1MA
1983-11/17-33

Abb. 7

K Ü R B I S K E R N Ö L
K L A C H L S U P P N
H E I D E N S T E R Z
V E R H A C K E R T S
S T E I R I S C H E R M O S T
S T E I R I S C H E A G E N T U R
W E R N E R M Ö R T H G E S. M. B. H.

