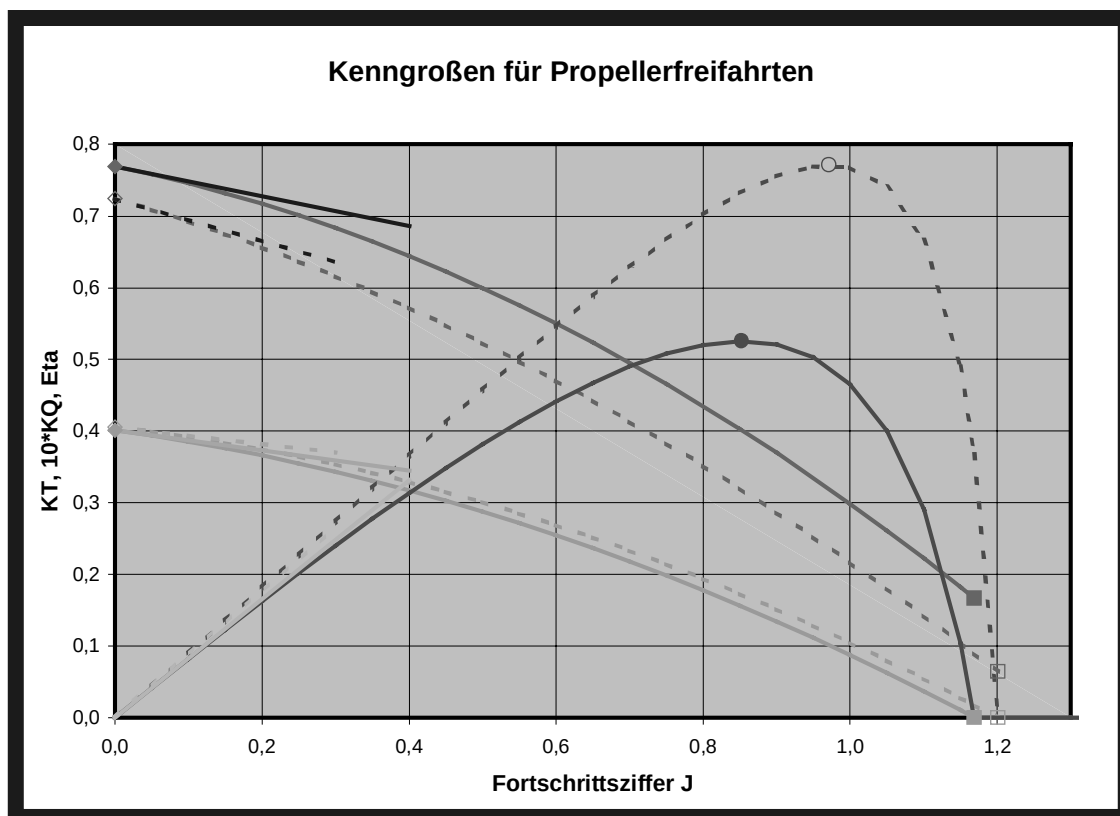




Untersuchung der Maßstabseffekte kleiner Modellpropeller zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit

Bericht Nr. 1491

September 1998

Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft der industriellen
Forschungsvereinigungen



Zusammenfassung

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Verbesserung der Hochrechnung der durch das Drehmoment und die Drehzahl definierten Leistung auf die Großausführung, um eine bessere Genauigkeit bei der Prognose für künftige Schiffsentwicklungen zu erreichen. Es wurden systematische Freifahrtversuche mit Modellpropellern in 6 Modellmaßstäben bei jeweils unterschiedlichen Propellerdrehzahlen und damit Reynoldszahlen sowie Propulsions- und Trossenzugversuche mit einer Geosim-Serie eines Binnenschiffs in vier Maßstäben durchgeführt. Auf der Basis der Umrechnung nach Meyne wurden diese Modellversuche ausgewertet, analysiert und ein Verfahren angegeben, mit dem die Änderung des Drehmomentes in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei der Umrechnung auf das naturgroße Schiff neu prognostiziert werden kann. Damit ist ein wichtiger Schritt zur Verbesserung des Leistungspotentials der VBD getan, indem die bisher verwendeten Methoden und Verfahren auf der Basis aktueller Untersuchungen verbessert und dem Stand der Technik angepaßt wurden. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Dieses Vorhaben wurde in dankenswerter Weise von der Arbeitsgemeinschaft der industriellen Forschungsvereinigungen (AiF) mit Mitteln des BMWi gefördert.

**Untersuchung der Maßstabeffekte kleiner Modellpropeller zur
Verbesserung der Prognosegenauigkeit**

Duisburg, den 30.9.1998

Fachbereich Hydromechanik

Bearbeiter:

.....
(Dr.-Ing. A. Gronarz)

Fachbereich I :

.....
(Dr.-Ing. H.G. Zibell)

**Europäisches Entwicklungszentrum für
Binnen- und Küstenschifffahrt**
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg

.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Gliederung:

Zusammenfassung

1.	Einleitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Stand der bisherigen Forschung	4
1.3	Zielsetzung	7
1.4	Bedeutung	8
2.	Modellversuche	8
2.1	Propellerfreifahrten	8
2.2	Propulsionsversuche	10
3.	Auswertung	11
3.1	Propellerfreifahrtversuche	11
3.1.1	Konventionelle Umrechnung	11
3.1.2	Umrechnung nach Meyne	12
3.2	Propulsionsversuche	14
4.	Analyse	16
4.1	Definition von Kenngrößen	16
4.2	Gegenüberstellung der Kenngrößen	19
4.3	Ableitung einer Korrekturfunktion	23
4.4	Maßstabseffekt aus den Propulsionsversuchen	25

Anhänge:

A	Abbildungsverzeichnis
B	Symbolverzeichnis
C	Literatur
D	Abbildungen und Tabellen



1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Für die Leistungsprognose von Schiffen und insbesondere von Binnenschiffen auf flachem Wasser ist der Modellversuch immer noch unabdingbar. Zur Optimierung der Schiffsumströmung bzw. des Propellerzustroms werden heute z.T. schon theoretische Rechenverfahren zusammen mit dem Modellversuch eingesetzt. Mit den theoretisch-numerischen Verfahren wird aber auch in absehbarer Zeit die von den Kunden geforderte und von den Versuchsanstalten erwünschte Prognosegenauigkeit nicht erreicht werden (Bertram, 1994).

Die Ergebnisse des Modellversuchs sind in starkem Maße maßstabsbehaftet, da bei Froudescher Ähnlichkeit die Zähigkeitsbedingten Einflüsse bei Modell- und Großausführung der Schiffe unterschiedlich sind. Die Reynoldssche Ähnlichkeit kann aus praktischen Gründen nicht erfüllt werden.

Zur Bestimmung der Kennwerte des Modellpropellers (Schub-, Drehmomentbeiwert und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Fortschrittsziffer) werden in den Schiffbauversuchsanstalten üblicherweise Propellerfreifahrtversuche durchgeführt. Dabei wird die Newtonsche Ähnlichkeit erfüllt. Die Propellerdrehzahl wird so hoch wie praktisch möglich gewählt. Trotzdem liegen die Reynoldszahlen der Modellpropeller $R_{np} = c_{07R} \cdot u_{07R} / n$ ca. zwei Zehnerpotenzen niedriger als die der Propeller in der Großausführung.

Zur Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf den großen Propeller ist die Kenntnis der Maßstabseffekte erforderlich, die im wesentlichen auf Zähigkeitseffekte zurückzuführen sind. Diese Propellermaßstabseffekte werden mit kleiner werdendem Modellpropeller, wegen der damit im Versuch maximal erreichbaren kleineren Reynoldszahlen, deutlich größer.

Bedingt durch die Begrenzung der Fahrwassertiefe besitzen Binnenschiffe im Vergleich zu Seeschiffen relativ kleine Propeller. Daher haben die Modellpropeller von



Binnenschiffsmodellen in der Regel Durchmesser in einer Größenordnung von 100 mm bis 130 mm. Bei Schubverbänden und Motorgüterschiffen, die für extrem geringe Wassertiefen konzipiert sind, werden maßstabsbedingt sogar Modellpropeller mit einem Durchmesser von 80 mm und kleiner eingesetzt. Modelle von Seeschiffspropellern besitzen dagegen im allgemeinen Durchmesser, die meist wesentlich größer als 150 mm sind.

Bei den Propulsionsversuchen und hier insbesondere im Teillastbereich sind die Reynoldszahlen (bei Froudescher Ähnlichkeit) wegen der geringeren Drehzahlen noch kleiner als bei den Freifahrtversuchen. Der Propeller arbeitet in einer gegenüber dem Freifahrtversuch durch den Nachstrom des Schiffes veränderten Anströmung. Wegen der veränderten Strömungsverhältnisse auf dem Propeller sind dabei im Vergleich zu den Freifahrtversuchen geänderte Maßstabsfaktoren anzusetzen. Der Wirkungsgrad des Modellpropellers wird hinter dem Schiff im allgemeinen günstiger als im Freifahrtversuch.

Die zahlreichen für Seeschiffe durchgeführten Untersuchungen können nur bedingt auf Binnenschiffe übertragen werden, da die Schubbelastung C_{Th} der Binnenschiffspropeller deutlich höher ist als die der Seeschiffspropeller, d.h. Binnenschiffspropeller arbeiten in einem anderen Bereich der Fortschrittsziffern.

Daher bestehen bei der Leistungsprognose für Binnenschiffe mit relativ kleinen Propellern auf der Grundlage von Propulsionsversuchen noch größere Unsicherheiten bezüglich der Propellermaßstabseffekte.

1.2 Stand der bisherigen Forschung

Die Verbesserung der Leistungsprognose von Schiffen ist nach wie vor Gegenstand intensiver Bemühungen (ITTC 1957-1993). Dabei ist die Bestimmung der Maßstabseffekte eine wesentliche Teilaufgabe.



In (ITTC 1978a) wurde die ITTC 78 „Performance Prediction Method“ mit Ergänzungen in (ITTC 1984 und 1987) ausführlich dargestellt. Diese Methode soll eine einheitliche und damit vergleichbare Umrechnung der Modellversuchsergebnisse in den Versuchsanstalten zur Erstellung von Leistungsprognosen festlegen. Für die Umrechnung der Ergebnisse des Freifahrtversuchs werden Korrekturen angegeben, die sich auf empirische Grenzschichtuntersuchungen an Profilen stützen und die die Rauigkeit der Propelleroberfläche berücksichtigen. Die Strömung am Modellpropeller liegt im Übergangsgebiet von laminar zu turbulent. Daher ist die Angabe von Reibungsbeiwerten mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Für Binnenschiffe ist die ITTC 78 Performance Prediction Method ohne Modifikationen nicht anwendbar. Die für den Freifahrtversuch angegebenen Korrekturen sind, wie sich zeigte, offensichtlich für Binnenschiffspropeller nicht gültig, da deren Durchmesser praktisch immer kleiner als 2 m sind. Die Ergebnisse der Propulsionsversuche werden mit Korrekturen des effektiven Nachstroms und der Drehzahl auf die Großausführung übertragen. Eine Propellermaßstabskorrektur, wie sie beim Freifahrtversuch durchgeführt wird, ist dabei nicht vorgesehen.

Meyne hat ein Verfahren zur praktischen Bestimmung der Maßstabeffekte beim Propellerfreifahrtversuch dargelegt (Meyne 1972 und 1982). Das Verfahren beruht im wesentlichen auf der Bestimmung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte des Propellers nach der Theorie des "äquivalenten Profils" auf $0,7 D$ nach (Lerbs 1951). Meyne hat anhand seiner umfangreichen Untersuchungen gezeigt, daß sich die Maßstabeffekte - verminderter Schubbeiwert K_T , erhöhter Drehmomentbeiwert K_Q des Modellpropellers gegenüber der Großausführung - in der Hauptsache auf einen erhöhten Reibungswiderstand des Modellpropellers zurückführen lassen. Aus den Ergebnissen des Freifahrtversuchs (bei einer mittleren konstanten Reynoldszahl) läßt sich ein minimaler Reibungswiderstandsbeiwert für den einzelnen Modellpropeller errechnen, der unabhängig ist von der Fortschrittsziffer. Mit dem theoretischen Beiwert nach der Schoenherr-Linie bei $R_{np} = 1 \cdot 10^7$ werden Schub-, Drehmomentbeiwert und Wirkungsgrad h_0 auf die Großausführung umgerechnet.



Das Verfahren von Meyne wird von der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt standardmäßig (HSVA) bei der Prognose des Leistungsbedarfs von Seeschiffen - also für Schiffe mit mäßig belasteten Propellern und größeren Propellerdurchmessern - mit sehr gutem Erfolg eingesetzt (Collatz 1976 und 1984). Bei der Umrechnung der Ergebnisse des Propulsionsversuchs wird ebenfalls ein Maßstabs-effekt berücksichtigt. Dabei wird angenommen, daß für den Propulsionsversuch der minimale Reibungsbeiwert des Modellpropellers nach der ITTC 57-Linie in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bestimmt werden kann.

In der VBD sind in der Vergangenheit bereits systematische Versuche zur Ermittlung des Propellermaßstabeffekts durchgeführt worden (Sturtzel et al. 1959). Zur generellen Bestimmung der Maßstabsabhängigkeit des Drehmomentes bzw. der aufgenommenen Leistung bei Modellpropellern in Abhängigkeit von der Reynoldszahl R_{np} wurden die Ergebnisse der Untersuchungen einer Vielzahl von Modellpropellern - u.a. auch Ergebnisse der HSVA - einbezogen.

Diese Untersuchungen wurden später ergänzt für hochbelastete Düsenpropeller (Heuser 1977). Die Propellermaßstabsfaktoren liegen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl und der Schubbelastung vor. Im Bereich kleiner Reynoldszahlen zeigen die Abhängigkeiten (Kurven) einen steilen Verlauf. Eine Extrapolation für kleine Modellpropeller bzw. für sehr kleine Reynoldszahlen ist in diesem Bereich mit großen Unsicherheiten behaftet und daher nicht durchführbar. Das Verfahren von Meyne wurde in der VBD bereits bei verschiedenen Forschungsvorhaben mit gutem Erfolg für größere Modellpropeller ($D > 180$ mm) eingesetzt.

Einzelne Untersuchungen mit kleinen Modellpropellern (Zibell 1992) lassen erwarten, daß das Verfahren auch den für Binnenschiffe interessierenden Bereich der hohen Schubbelastungsgrade, d.h. den Bereich sehr kleiner Fortschrittsziffern mit guter Genauigkeit beschreibt, wenn hier zusätzliche Korrekturen angesetzt werden. Es zeigte sich bei den bisher in der VBD durchgeführten Freifahrtuntersuchungen, daß mit der Umrechnung nach Meyne die Wirkungsgrade des Propellers in der Großausführung in der Nähe des Optimums zu günstig sind, d.h. es ist möglicherweise



zur besseren Korrelation ein gegenüber der ITTC-Linie erhöhter Reibungswiderstandsbeiwert für den großen Propeller anzusetzen.

Die Ergebnisse von Propulsionsversuchen mit kleinen Modellpropellern deuten darauf hin, daß für die Umrechnung nach Meyne gegenüber der ITTC-Linie erhöhte Reibungswiderstandsbeiwerte für den Modellpropeller im Propulsionsversuch anzusetzen sind. Die Ermittlung von Widerstandsbeiwerten des Propellers aus dem Propulsionsversuch und damit die direkte Bestimmung der Maßstabeffekte für den Propulsionsversuch unter Anwendung des Verfahrens von Meyne sind bisher noch nicht durchgeführt worden.

1.3 Zielsetzung

Mit der Methode von Meyne zur Umrechnung der Ergebnisse von Propellerfreifahrtversuchen auf die Großausführung steht ein leistungsfähiges Rechenverfahren zur quantitativen Bestimmung von Maßstabeffekten zur Verfügung.

Mit gutem Erfolg wird dieses Verfahren bisher nur für Seeschiffspropeller mit niedrigen und mittleren Schubbelastungsgraden standardmäßig eingesetzt.

Für die Anwendung des Verfahrens an Modellpropellern für Binnenschiffe und zur Bestimmung der Propellermaßstabeffekte beim Propulsionsversuch ist diese Methode zu erweitern, bzw. zu vervollständigen. Die geplanten Untersuchungen sollen die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Propellerfreifahrt- und Propulsionsversuchen auf die Großausführung insbesondere bei kleinen Modellpropellern verbessern.

Verfahren zur generellen Bestimmung der Propellermaßstabeffekte beinhalten insbesondere für relativ kleine Modellpropeller größere Unsicherheiten. Die Propellermaßstabeffekte können mit dem Verfahren von Meyne genauer bestimmt werden, da der Reibungsbeiwert des individuellen Propellers im Versuch bestimmt wird und in die Umrechnung eingeht. Die Zuverlässigkeit von Leistungsprognosen auf der



Grundlage von Propulsionsversuchen für Binnenschiffe mit relativ kleinen Propellern soll damit entscheidend verbessert werden.

1.4 Bedeutung

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wird die zuverlässigere Übertragbarkeit von Freifahrt- und Propulsionsversuchen auf die Großausführung gewährleistet. Damit wird vor allem die Leistungsprognose bei Binnenschiffen, kleineren Fähren, Dienstfahrzeugen etc. verbessert.

Bei den Untersuchungen von Binnenschiffen für den Einsatz auf extrem kleinen Wassertiefen bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten werden verlässliche Maßstabskorrekturen dringend benötigt, um auch diese Schiffe optimieren zu können.

2. Modellversuche

2.1 Propellerfreifahrten

Mit 6 geometrisch ähnlichen Modellpropellern unterschiedlicher Größe (Geosimserie) wurden Freifahrtversuche jeweils mit unterschiedlichen Drehzahlen (Reynoldszahlen) durchgeführt.

Die Durchmesser von 4 Modellpropellern entsprachen einer vorhandenen Geosimserie eines Motorgüterschiffes, wobei 3 dieser Propeller vorhanden waren und 2 angefertigt wurden. Der Durchmesser eines herzustellenden relativ großen Modellpropellers wurde so gewählt, daß mit diesem auch Freifahrtversuche mit entsprechend hohen Reynoldszahlen ($R_{np} = 6 \cdot 10^5$ bei $D = 260$ mm) durchgeführt werden konnten. Für diesen sind die Maßstabseffekte klein und im Bereich kleiner Fortschrittsziffern kaum relevant.

Die Daten der verwendeten Propeller (als dimensionsbehaftete sowie dimensionslose Größen) sind in den beiden folgenden Tabellen zusammengestellt.

Dimensionslose Größen

Propellertyp		Wageningen, B-Serie
Drehrichtung		rechts
Flügelzahl	Z	4
Steigungsverhältnis	P/D	1,07
Flächenverhältnis	A_e/A_0	0,55
Nabenverhältnis	dn/D	0,167
Blattdickenverhältnis	t/c	0,0535

Dimensionsbehaftete Größen

	Maßstab	6,25	10	13	16	20	25
Durchmesser	D [mm]	260,000	162,500	125,000	101,560	81,250	65,000
Steigung	P [mm]	278,20	174,00	133,75	108,67	87,00	69,60
Nabendurchmesser	dn [mm]	45,000	27,140	20,875	16,961	13,570	10,860
Profillänge bei 0,7R	c07R [mm]	76,68	47,93	36,87	29,86	23,96	19,17
Blattdicke bei 0,7R	tmax [mm]	4,100	2,563	1,971	1,597	1,281	1,025

Beispielhaft sind in Abb. 1 und Abb. 2 die Geometrie und die Profile des größten verwendeten Propellers dargestellt. Diese Informationen sowie detaillierte Tabellen über die genaue Profilform dienen zur Herstellung des Propellers.

Die bei den Propellerfreifahrten tatsächlich erreichten Reynoldszahlen in Abhängigkeit vom Modellmaßstab sind in der untenstehenden Tabelle sowie Abb. 3 dargestellt.

D	$R_{np\min} \cdot 10^{-5}$ - $R_{np\max} \cdot 10^{-5}$	Modellmaßstab l
260 mm	1,64 - 6,1	6,25
162,5 mm	0,96 - 3,2	10
125 mm	0,94 - 2,8	13
101,6 mm	0,73 - 2,4	16
81,3 mm	0,48 - 0,99	20
65 mm	0,38 - 0,64	25

Bei den umfangreichen durchgeführten Freifahrtversuchen wurde auch die Wirkung eines Turbulenzerzeugers in einiger Entfernung vor der Propellerebene insbesondere bei sehr kleinen Reynoldszahlen überprüft. Dies wurde durch ein in die Anströmung eingebrachtes Gitter realisiert. Bei den Messungen des Schubs und des Drehmomentes wurden dabei höhere Fortschrittsgrade für gleichen Schub festgestellt. Dies ist durch die Störung der Anströmung zu erklären. Eine Umrechnung des Fortschrittsgrads über die Schubidentität ermöglicht den Vergleich mit Freifahrtversuchen in ungestörter Anströmung.

Die Registrierung der Versuchsergebnisse erfolgte über ein EDV-Programm, in dem die von den Meßverstärkern gelieferten Spannungen direkt in physikalische Größen umgerechnet wurden. Diese wurden zur weiteren Verarbeitung (Auswertung) auf Datenträgern archiviert.

2.2 Propulsionsversuche

Zusätzlich zu den verschiedenen Propellerfreifahrten wurde anhand von Propulsionsversuchen die Übertragbarkeit von Modellversuchsergebnissen bei unterschiedlichen Maßstäben überprüft. Im Gegensatz zu den Freifahrten befindet sich



der Propeller hier im Nachstromfeld des Schiffsmodells und arbeitet in dem problematischen Bereich relativ kleiner Reynoldszahlen.

Mit vier Modellen verschiedener Maßstäbe einer Geosimserie eines Binnenschiffs wurden Pfahlzug-, Trossenzug- sowie Propulsionsversuche durchgeführt. Dabei handelte es sich um die vier kleinsten Modellpropeller der Freifahrtserie, Propellermaßstab $l = 13, 16, 20$ und 25 . Die Abb. 4 zeigt den Spantenriß des für die Untersuchungen verwendeten Schiffes.

Die Propulsionsversuche wurden mit der Drehzahl durchgeführt, die erforderlich war, um den Widerstand des Modells - abzüglich der üblichen Reibungskorrektur nach (ITTC 57, 1957) - zu überwinden. Bei den Trossen- und Pfahlzugversuchen (= Trossenzug bei Geschwindigkeit 0) hingegen wurde eine höhere Drehzahl eingestellt und die überschüssige Zugkraft registriert.

Auch hier wurden die Meßergebnisse auf elektronischen Datenträgern gesammelt und mit in der VBD entwickelter Software sowie käuflichen Tabellenkalkulationsprogrammen verarbeitet, ausgewertet und analysiert.

3. Auswertung

3.1 Propellerfreifahrtversuche

3.1.1 Konventionelle Umrechnung

In der VBD wurde ein Programm entwickelt, welches für die standardmäßige Umrechnung der Meßergebnisse von Propellerfreifahrten einschließlich der graphischen Ergebnisdarstellung verwendet wird. Unter der Standard-Auswertung wird die Berechnung von dimensionslosen Größen Fortschrittsziffer J , Schubbeiwert K_T , Drehmomentbeiwert K_Q sowie des Wirkungsgrads h_0 verstanden.



$$J = \frac{u_p}{n \cdot D}$$

$$K_T = \frac{T}{r \cdot n^2 \cdot D^4}$$

$$K_Q = \frac{Q}{r \cdot n^2 \cdot D^5}$$

$$h_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2p}$$

Eine Berechnung der dimensionslosen Ergebnisse eines Freifahrtversuchs auf dieser Basis erlaubt jedoch keine Aussage über die Eigenschaften des Propellers in einem anderen Maßstab, da die Beiwerte immer noch von Maßstabseinflüssen, insbesondere durch die Reynoldszahl abhängig sind.

3.1.2 Umrechnung nach Meyne

Das existierende Rechenprogramm zur Umrechnung von Freifahrtversuchsergebnissen wurde dahingehend erweitert, daß die Maßstabseffekte nach dem Verfahren von (Meyne, 1972) berücksichtigt wurden. Die Umrechnung erfolgt auf der Basis des äquivalenten Profils, indem ausgehend von den Reibungskräften am Modellpropeller in der Messung auf die Reibung für den Propeller in Großausführung, d.h. eine Reynoldszahl von $R_{np} = 1 \cdot 10^7$ hochgerechnet wird. Als Ergebnis werden neue Werte K_T^* und K_Q^* über der Fortschrittsziffer J ausgegeben, die für einen Propeller dieser Geometrie in hochturbulenter Strömung gelten.

Zusätzliche Arbeiten am Programm beinhalteten eine Stabilisierung der Iterationen zu Berechnung der Beiwerte für hohe Reynoldszahlen sowie eine Umkehrung der Bearbeitungsschleife, um die Qualität der Berechnung zu verbessern. Außerdem wurden Methoden verifiziert, um die Verarbeitung der Daten mit dem Programm automatisieren zu können.



Alle Propellerfreifahrtversuche wurden mit der überarbeiteten Software nach folgendem Schema ausgewertet.

1. Sortieren der Daten nach aufsteigender Versuchsgeschwindigkeit.
2. Berechnung der Beiwerte J , K_T und K_Q für den Modellpropeller
3. Glätten der Daten und Interpolation auf ca. 40 Werte zwischen 0 und $J_{\max}$
4. Berechnung der Beiwerte K_T^* und K_Q^* für die Großausführung aus den geglätteten Daten
5. Ausgabe der Ergebnisse in eine Datei

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5 bis 10 für die verschiedenen untersuchten Maßstäbe wiedergegeben. Dabei handelt es sich um eine Auswahl, für die Versuche mit gleichen Randbedingungen herangezogen wurden. Es sind zusätzlich zu den Beiwerten K_T , K_Q und h_0 die Werte K_Q^* und h_0^* für die Umrechnung nach Meyne eingetragen. Auf eine Darstellung der Werte für K_T^* nach Meyne wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, da diese nur minimal von den Beiwerten K_T abweichen.

Die Darstellung entspricht der üblichen Form für Propellerfreifahrtprogramme, bei der wegen der numerischen Größe des Wertes K_Q dieser als $10 \cdot K_Q$ dargestellt wird, um nur eine Skala für die Ordinate verwenden zu müssen. Es wurde darauf verzichtet, die eigentlichen Versuchsparameter (hier die Propellerdrehzahl) anzugeben, da diese für eine Aussage von untergeordneter Bedeutung sind. Vielmehr ist der ausschlaggebende Parameter, die dimensionslose Ähnlichkeitskennziffer R_n , gewählt worden, der in diesem Vorhaben eine zentrale Bedeutung besitzt.

Bei der Betrachtung der 6 Abbildungen für die verschiedenen Modellmaßstäbe fällt auf, daß die Maxima der Wirkungsgrade h_0^* (Eta*) der Umrechnung nach Meyne alle auf einen Mittelwert von ca. 0,77 hinweisen. Besonders deutlich wird dies bei Abb. 6. Dies bestätigt die Qualität des Umrechnungsverfahrens, indem gezeigt wird, daß die Hochrechnung auf eine Reynoldszahl von $R_{np} = 1 \cdot 10^7$ sehr gute Ergebnisse liefert.



Außerdem kann man erkennen, daß die Kurven nach aufsteigender Reynoldszahl gestaffelt sind, und zwar sowohl für die Beiwerte für Schub und Drehmoment K_T und K_Q als auch besonders deutlich für die Wirkungsgrade h_0 . Bei den anderen Maßstäben ist diese Anordnung nicht so klar festzustellen – in diesen Fällen handelt es sich um Meßungenauigkeiten, die zwar minimierbar, aber technisch nicht zu vermeiden sind.

3.2 Propulsionsversuche

Bei den Propulsions- und Trossenzugversuchen ging es im Gegensatz zu dem üblichen Ziel, der Bestimmung des Leistungsbedarfs, vornehmlich um das Verhalten des Propellers im Nachstrom des Schiffskörpers bei den verschiedenen untersuchten Maßstäben. Dabei wurden die relevanten Daten Modellgeschwindigkeit V , Propellerdrehzahl n , Propellerschub T und Drehmoment Q registriert.

Man kann diese Ergebnisse einer Auswertung mit dem Programm für Propellerfreifahrten unterziehen, um zu dimensionslosen Größen K_T , K_Q und h zu gelangen. Es können jedoch keine vollständigen Kurven von $J = 0$ bis $J_{\max}$ erstellt werden, da in den Propulsionsversuchen nur ein eingeschränkter Betriebsbereich durchfahren wurde.

Da es sich um die identischen Propeller, die bei den Freifahrten untersucht wurden, handelte, muß die Charakteristik des Schub- und des Drehmomentverlaufs übereinstimmen. Sollte dies nicht der Fall sein, sind die Unterschiede in den Anströmbedingungen zu suchen. Dies ist die übliche Betrachtungsweise – bei diesen Modellversuchen unter Verwendung einer Geosimserie kann zusätzlich der unterschiedliche Verlauf der Kurven K_T und K_Q auf den Maßstabseinfluß hin untersucht werden.

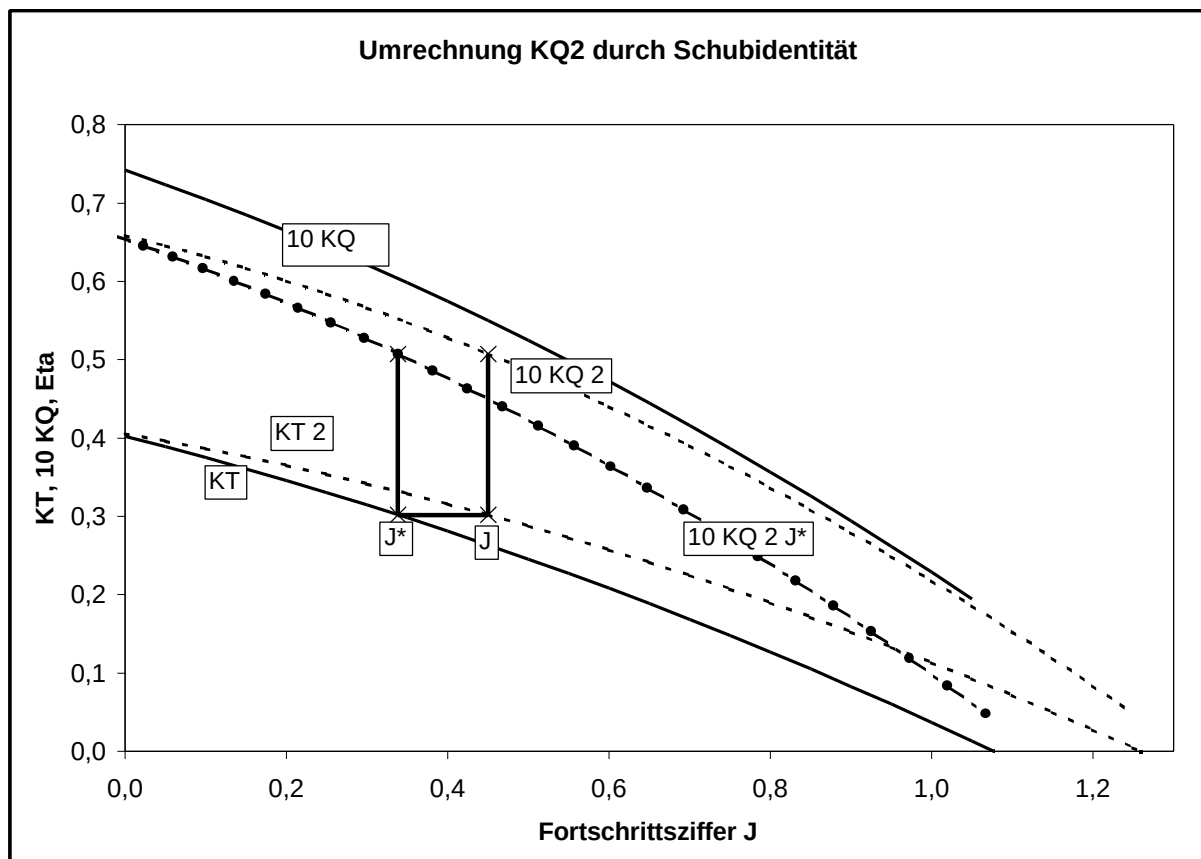
Die Rückführung der Schub- und Drehmomentbeiwerte auf den Fall der ungestörten Anströmung erfolgt durch Anwendung der Schubidentität mit den Ergebnisse der Propellerfreifahrtversuche. Dabei handelt es sich um die Neuberechnung der Fortschrittsziffer für die K_Q -Kurve, indem von der Annahme ausgegangen wird, daß



nicht der Schub, sondern nur die Leistungsaufnahme des Propellers von Maßstabs-
effekten beeinflusst wird.

Ein entsprechender Algorithmus unter Verwendung der Polynomkoeffizienten für die
geglätteten Beiwerte wurde programmiert und getestet. Als Beispiel ist in der folgen-
den Darstellung die Vorgehensweise bei der Umrechnung auf der Basis der Schub-
identität erläutert.

Eine Propellerfreifahrt in ungestörter Anströmung liefert die Werte K_T und K_Q über
 J (durchgezogene Linien in der folgenden Abbildung). Unter anderen Anström-
bedingungen werden beispielsweise K_{T2} und K_{Q2} (gepunktete Linien) gemessen.
Ausgehend von einem Wert K_{Q2} und dem dazugehörigen Wert K_{T2} (bei gleichem
 J) wird für diesen Schubbeiwert das J^* gesucht, bei dem die Propellerfreifahrt in
ungestörter Anströmung den identischen Schub K_T aufweist. Der Wert für K_{Q2} wird
nun auf diesen Wert J^* verschoben und die neue Kurve K_{Q2J^*} gebildet.





Das übliche Ziel dieser Auswertung ist die Bestimmung des Fortschrittsgrades des Propellers im Propulsionsversuch und damit der mittleren Anströmgeschwindigkeit des Propellers. Der verwendete Fortschrittsgrad J wurde mit der Modellgeschwindigkeit gebildet, wohingegen das Strömungsfeld, in dem der Propeller arbeitet, durch den sogenannten Nachstrom beeinflusst wird. Diese Verringerung der Anströmgeschwindigkeit, ausgedrückt durch die Nachstromziffer w , läßt sich nach Anwendung der Schubidentität aus der neuen Fortschrittsziffer J^* ableiten.

Hier wurde jedoch das Augenmerk auf die Änderung des Drehmoments zwischen Propulsionsversuch und den für die Großausführung hochgerechneten Freifahrtkurven gelegt, indem bei gleichem Schubbeiwert K_T das im Propulsionsversuch gemessene Moment (bzw. sein Beiwert K_Q) mit dem für die Großausführung hochgerechneten Drehmomentbeiwert K_Q^* verglichen werden. Dieses Verhältnis K_Q^*/K_Q ist der Maßstabseffekt m_p , der es ermöglicht, die im Propulsionsversuch bestimmte Wellenleistung auf die Großausführung umzurechnen.

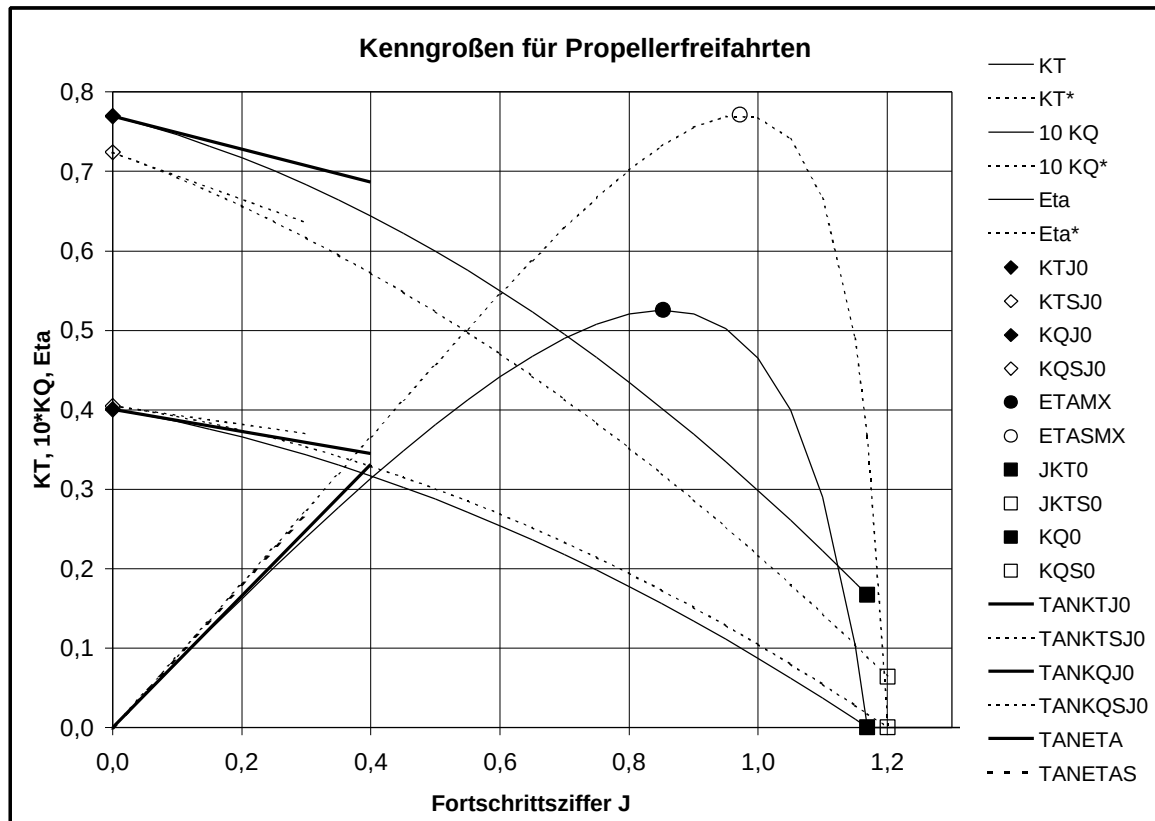
In den Abbildungen 11 bis 14 sind diese Werte m_p , die sowohl aus echten Propulsionsversuchen als auch aus Trossen- und Pfahlzugversuchen gewonnen wurden, über der Reynoldszahl des Modellversuchs aufgetragen. Dabei wurde für jeden Modellmaßstab aus der Reihe $l = 13, 16, 20$ und 25 ein separates Diagramm erstellt, um die relativ große Anzahl von Daten sinnvoll darstellen zu können.

4. Analyse

4.1 Definition von Kenngrößen

Bei der Auswertung großer Datenmengen treten Probleme in Bezug auf die Übersichtlichkeit und die Verwaltung dieser Daten auf. Ein übliches und sinnvolles Verfahren ist die Reduktion auf Kenngrößen, die untereinander leicht gegenüberzustellen bzw. zu vergleichen sind. In Bezug auf die Propellerfreifahrt existierten derartige Kenngrößen bisher nicht. Aus diesem Grund wurden solche Größen definiert, berechnet und in einer Datenbank zusammengestellt.

Die Erläuterung dieser Kenngrößen erfolgt zweckmäßigerweise anhand der nachstehenden Abbildung, die diese Werte in einem Freifahrtdiagramm sichtbar macht.



Es handelt sich im Gegensatz zu den aus den Versuchen gewonnenen Datentabellen mit den dimensionslosen Beiwerten, welche die Basis für die Kurven K_T , K_Q und h_0 (Eta) bilden, um eine genau begrenzte Anzahl von Daten, mit denen ein Propellerfreifahrtdiagramm ohne Informationsverlust reproduziert werden kann. In der folgenden Tabelle werden diese Kenngrößen für die einzelnen Kurven zusammengestellt und erläutert.

Bezeichnung	Kurve	Beschreibung
KTJ0	KT	Wert für KT bei J=0, Schnittpunkt mit der Ordinate
JKT0	KT	Fortschrittsziffer, bei der KT zu 0 wird, Schnittpunkt mit der Abszisse
TANKTJ0	KT	Steigung der KT-Kurve bei J=0
KQJ0	KQ	Wert für KQ bei J=0, Schnittpunkt mit der Ordinate
KQ0	KQ	Wert für KQ bei der Fortschrittsziffer JKT0
TANKQJ0	KQ	Steigung der KQ-Kurve bei J=0
ETAMX	Eta	Maximalwert der Wirkungsgradkurve
JETAMX	Eta	Fortschrittsziffer, bei der ETAMX erreicht wird
TANETA	Eta	Steigung der Eta-Kurve bei J=0

Analog gelten für die Umrechnungen auf die Großausführung nach Meyne, die üblicherweise durch einen Stern „*“ bezeichnet werden, die gleichen Definitionen. Die Bezeichnung wird hier durch den Buchstaben „S“ ergänzt. Für jede Propellerfreifahrt sind diese Kenngrößen in einer Spalte der Datenbank eingetragen.

Bei der Auswertung der Messungen mit dem Programm werden Koeffizienten für ein Polynom 2. Grades für die Kurven K_T und K_Q erzeugt. Die allgemeine Darstellung lautet:

$$K_T(J) = K_{T0} + K_{T1} \cdot J + K_{T2} \cdot J^2$$

$$K_Q(J) = K_{Q0} + K_{Q1} \cdot J + K_{Q2} \cdot J^2$$

Aus den Polynomkoeffizienten lassen sich die Kenngrößen durch direkte Berechnung bzw. Iteration generieren. Sie beschreiben den Verlauf der Kurven durch Angabe des Anfangs- und Endpunktes sowie der Steigung für die Fortschrittsziffer 0. Die Kurve des Wirkungsgrads h_0 (Eta) wird aus den Kurven für Schub- und Drehmomentbeiwert berechnet und zusätzlich zum Anfangs- und Endpunkt sowie der Steigung für J=0 durch Angabe des Maximums (horizontale Tangente) als Punkt definiert.



So ist beispielsweise der Wert K_{T0} identisch mit der Polynom-Konstanten K_{T0} , die Steigung $TANKT0$ gleich K_{T1} (dem Koeffizienten des linearen Terms des Polynoms) und der Wert $JKT0$ die Lösung der Gleichung $K_T(J) = 0$. Mit dieser Information läßt sich K_{Q0} , der Wert der K_Q -Kurve an der Stelle, bei der die K_T -Kurve die Abszisse schneidet, als Wert $K_Q(J_{KT0})$ der Polynomfunktion berechnen.

4.2 Gegenüberstellung der Kenngrößen

Im Gegensatz zu den Abbildungen 5 bis 10, in denen die Vielzahl der Kurven die Ablesung von Informationen erschwert, führt die Auftragung einzelner Kenngrößen über die entsprechenden Variationsparameter zu leicht interpretierbaren Aussagen.

Die Kenngrößen aller durchgeführten Propellerfreifahrten wurden in einer Datenbank erfaßt und stehen auf diese Weise einem gemeinsamen Zugriff zur weiteren Analyse und Gegenüberstellung zur Verfügung. Zur Veranschaulichung der Daten sind in den Abbildungen 15 bis 30 die wichtigsten Kenngrößen über den beiden Haupteinflußparametern, dem Propellermaßstab und der Reynoldszahl dargestellt.

Es handelt sich hierbei um die Ergebnisse fast aller Propellerfreifahrten. Eine Vorselektion wurde bei der Sichtung der Zwischenergebnisse getroffen, indem mißlungene Versuche, bzw. Messungen, bei denen Unstimmigkeiten zu Fehlinterpretationen führen könnten, schon ausgefiltert wurden.

Der erste wichtige Parameter ist der Propellermaßstab l . So zeigt sich in Abb. 15, daß unabhängig von der Propellerdrehzahl für den Fall des Pfahlzugs der dimensionslose Propellerschub (Beiwert K_T) mit kleinerem Durchmesser abnimmt. Der Drehmomentbeiwert K_Q in Abb. 16 nimmt mit steigendem Maßstab zu, wenn auch in geringerem Maße.

Der Schub wird durch die Umrechnung nach Meyne kaum beeinflusst. Dies zeigt sich in Abb. 17 durch die Darstellung von K_T^* (verglichen mit K_T in Abb. 15). Das



Drehmoment K_Q^* (Abb. 18) jedoch zeigt nach der Umrechnung keine signifikante Abhängigkeit vom Modellmaßstab mehr.

In Abb. 19 ist der maximale Wirkungsgrad aus der Messung und in Abb. 20 nach der Umrechnung nach Meyne über dem Modellmaßstab aufgetragen. Während sich für die Meßwerte eine Abhängigkeit vom Maßstab zeigt (kleinerer Propeller = geringerer Wirkungsgrad), die zusätzlich von der Reynoldszahl beeinflusst wird, ist nach der Hochrechnung auf eine konstante Reynoldszahl ein wesentlich geringerer Maßstabseinfluß sichtbar.

In Bezug auf die Umrechnung durch das Verfahren von Meyne ist ein Vorher-Nachher-Vergleich sehr aufschlußreich. Da der Schubbeiwert kaum beeinflusst wird, werden in den Abbildungen 21 und 22 nur das Verhältnis der Drehmomentbeiwerte und der maximalen Wirkungsgrade vor und nach der Umrechnung aufgetragen. Bei dem Wert K_Q^*/K_Q (Abb. 21) zeigt sich (abgesehen von einigen „Ausreißern“ durch Meßfehler), daß durch die Umrechnung das Drehmoment geringer wird. In dieser Darstellung ist ein Reynoldszahleinfluß kaum wahrnehmbar. Die Änderung des maximalen Wirkungsgrades jedoch ist sehr deutlich sichtbar. Dies liegt unter anderem daran, daß die dargestellten Werte für den Drehmomentbeiwert bei der Fortschrittsziffer $J = 0$ angegeben werden, die maximalen Wirkungsgrade jedoch bei ca. 80% des Bereiches möglicher Fortschrittsgrade auftreten. Das Diagramm in Abb. 22 läßt erwarten, daß sowohl der Maßstab als auch die Reynoldszahl für die Änderung des Wirkungsgrades bei der Umrechnung signifikante Einflußgrößen sind.

Der zweite Parameter, nämlich die Reynoldszahl R_{np} - als für den Propeller maßgebende Ähnlichkeitskennziffer - bildet die Abszisse für die folgenden Abbildungen 23 bis 30. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Abbildungen, bei denen durch die geometrische Staffelung der Propeller schon eine klare Ordnung der Darstellung vorgegeben war, kann bei diesen Auftragungen der Parameter nicht mehr klar angeordnet werden. Dies liegt an der Tatsache, daß es sich um eine mittlere Reynoldszahl handelt, die sich während der Versuchsfahrt durch die variablen Schleppwagen-geschwindigkeiten ändert, und die von der eingestellten Propellerdrehzahl und dem Maßstab (Profillänge c_{07R}) beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist es bei allen folgen-



den Darstellungen wichtig, die für die einzelnen Maßstäbe unterschiedlichen Symbole zu beachten, um dadurch einen Überblick über die eventuell gekoppelte Abhängigkeit der gezeigten Kenngrößen sowohl von der Reynoldszahl als auch vom Propellermaßstab zu bekommen.

Abb. 23 zeigt für den Schubbeiwert K_T einen Anstieg mit wachsender Reynoldszahl. Dies ist für den Momentenbeiwert K_Q in Abb. 24 nicht abzulesen, sondern wird durch die Streuung der Daten verdeckt. Die gleiche Aussage gilt auch für die in den Abbildungen 25 und 26 dargestellten Kenngrößen K_T^* und K_Q^* . Die Abhängigkeit vom Maßstab tritt hier nicht deutlich hervor.

Bei den Wirkungsgraden vor (Abb. 27) und nach der Umrechnung (Abb. 28) sieht man den homogenisierenden Einfluß des Hochrechnungsverfahrens deutlich an der drastischen Reduktion der Streuung der Werte beim Vergleich der beiden Bilder. Leider ist durch die noch nicht vollzogene endgültige Filterung der Datensätze ein bezeichnender Trend kaum sichtbar, aber die nicht gleichmäßige Anordnung der Symbole in der Kurve für h_0^* auf einer horizontalen Geraden gibt Hinweise auf eine weitere Elimination von „unsauberen“ Messungen.

Für die Darstellung der Relationen „Nachher/Vorher“ für den Drehmomentbeiwert und den maximalen Wirkungsgrad gilt das vorher gesagte analog. Hier ist allerdings für K_Q^*/K_Q eine klarere Abhängigkeit von der Reynoldszahl zu erkennen als für das Verhältnis h_0^*/h_0 .

Für die folgende Analyse wurde eine weitere Auswahl aus der gesamten Datenbasis getroffen, die nur Propellerfreifahrten mit identischen Randbedingungen beinhaltete. Außerdem wurde auf eine Serie verzichtet, bei der sich im Nachhinein zeigte, daß die Versuchsergebnisse durch innere Reibung in dem Achslager, die nicht mehr quantifizierbar war, zu falschen Aussagen führen mußten. Es handelt sich dabei um die Serie mit dem Maßstab 1:6,25, die durch zu hohe Wirkungsgrade in Abb. 22 und Abb. 27 (Symbol = durchgestrichenes x) auffällig wurde.



Die Reduktion der Daten führt zu einer neuerlichen Darstellung der Abbildungen 29 und 30 in den Abbildungen 31 und 32. Diese unterscheiden sich neben der weitergehenden Filterung der Daten durch eine andere Skalierung der Abszisse (Vergrößerung) und eine Zuordnung der Maßstäbe zu den Symbolen durch Verbindung mit Linien. Dadurch wird es leichter möglich, in den Diagrammen einen dem Reynoldseinfluß überlagerten Maßstabseinfluß zu diagnostizieren.

Die Darstellung in Abb. 31 zeigt die Relation K_Q^*/K_Q . Im Versuchswesen wird darunter auch die Maßstabskorrektur m_p verstanden, die bei der Berechnung der Leistung für das naturgroße Schiff im Propulsionsversuch anzubringen ist. Ein gewisser Einfluß des Maßstabs ist abzulesen, indem bei gleicher Reynoldszahl für den kleineren Propeller eine stärkere Korrektur anzubringen ist. Die Abhängigkeit von der Ähnlichkeitskennziffer R_{nP} ist jedoch dominant.

Die Wirkungsgradänderung h_0^*/h_0 in Abb. 32 ist vergleichbar mit der Änderung des Drehmomentbeiwertes. Da, wie in Kap. 3.1.1. angeführt, der Wirkungsgrad in reziprokem Verhältnis zum Drehmoment steht, sind die Kurven hier ähnlich, aber nach oben geklappt. Die Unterschiede sind minimal, da sie nur durch den relativ geringen Einfluß, den die Änderung von K_T in K_T^* durch die Umrechnung nach Meyne hervorruft, bewirkt werden.

Zwei Beispiele für weitere Darstellungen sind in den Abbildungen 33 und 34 gegeben. Die Qualität der Hochrechnung, aber auch der Messungen, kann an der Abweichung der auf große R_{nP} hochgerechneten maximalen Wirkungsgrade von dem Mittelwert der ausgewählten Datensätze abgelesen werden. Es zeigt sich, daß die Abweichungen für kleinere Reynoldszahlen, also auch für kleinere Modellpropeller größer werden. Damit ist nicht die Qualität des Umrechnungsverfahrens in Frage gestellt, da dieses auf theoretischen Überlegungen und Ansätzen fußt, sondern es wird die Problematik der Messung kleiner Größen verdeutlicht, indem für geringerer Propellerdurchmesser eine größere Streuung der Ergebnisse aufgezeigt wird.

Sehr interessant ist die Darstellung in Abb. 34. Hier, und nur bei dieser Auftragung, zeigt sich ein deutlicher Einfluß des Maßstabs. Es handelt sich bei der Abszisse um



die umgerechnete Drehzahl, mit der der naturgroße Propeller mit einem Durchmesser von 1,625 m drehen würde, wenn man die im Freifahrtversuch eingestellte Drehzahl nach Froudescher Ähnlichkeit umrechnen würde. Es läßt sich daraus jedoch keine sinnvolle Aussage ableiten, obwohl hier der Einfluß der Reynoldszahl und der des Maßstabs „entzerrt“ wurden. Man sieht zwar deutlich, daß für eine Umrechnung der Propellermaßstab einen signifikanten Einfluß aufweist, aber da hier der physikalisch relevante Reynoldszahleinfluß verschleiert wird und die (für einen getauchten Körper unerhebliche) Froude-Beziehung hervorgehoben wird, kann man aus dieser Darstellung keine Schlüsse auf den Maßstabseffekt ziehen.

4.3 Ableitung einer Korrekturfunktion

In der Abb. 35 sind die Relationen h_0^*/h_0 für die ausgewählten Datensätze in starker Vergrößerung aufgetragen. Unter der Annahme, daß K_T unbeeinflusst ist, entspricht diese Änderung dem Kehrwert des bisher verwendeten Maßstabsfaktors, der (neben dem Schubbelastungsgrad) hauptsächlich von der Reynoldszahl abhängt.

In der VBD ist seit langer Zeit ein Verfahren zur Bestimmung des Maßstabsfaktors in Gebrauch (Sturtzel et al. 1959, Heuser 1977). Die Ergebnisse daraus sind in verschiedenen Algorithmen zusammengefaßt worden, die hier als VBD-Alt (1) und VBD-Alt (2) bezeichnet werden. Sie geben an, wie das Drehmoment Q mit dem Faktor m_p multipliziert werden muß, um für eine Prognose der Leistung korrekte Werte zu erhalten. Die Formeln (die jedoch nicht über alle Reynoldszahlen Gültigkeit haben), lauten:

$$m_p(1) = 1,0224 - 0,1033 / (R_n / 10^5 - 0,7314)$$

$$m_p(2) = 0,999888 - 0,3641 * e^{ (-R_n / 10^5) }$$

Diese Faktoren in Abhängigkeit von der Reynoldszahl sind in Abb. 35 reziprok (K_Q im Nenner bei der Bestimmung von h) aufgetragen. Es zeigt sich, daß sie die aus den Propellerfreifahrten gewonnenen Ergebnisse nur relativ ungenau treffen. Dahin-



gegen stellt die als fette Linie eingetragene Kurve eine weitaus bessere Approximation der aus den Messungen gewonnenen Daten dar. Durch sie wird der aufgezeigte Zusammenhang erheblich besser angenähert und ist für eine Prognose eindeutig wertvoller nutzbar. Die formelmäßige Beschreibung dieses neuen Umrechnungsfaktors für Propellerfreifahrten lautet:

$$m_P(3) = 1,06 - 0,42 / (R_n / 10^5 + 0,55)$$

Es handelt sich hier um eine handliche Formel, die es ermöglicht, für den Bereich der Fortschrittsziffer, in dem jeweils der maximale Wirkungsgrad auftritt, eine Hochrechnung des Drehmomentes auf die Großausführung durchzuführen. Damit ist eine Alternative zur Umrechnung nach Meyne angegeben, die auf Propellerfreifahrten angewendet werden kann.

Bei dieser Darstellung muß bedacht werden, daß sich in der Umrechnung nach Meyne auch der Schubbeiwert K_T ändert, wenn auch nur geringfügig. Die Loslösung von diesem Effekt ist durch den Vergleich der Drehmomentbeiwerte alleine möglich. Dabei ist jedoch, um der Praxis nahezukommen, nicht der K_Q -Wert für den Pfahlzug, sondern ein Wert im Bereich des Auslegungspunktes heranzuziehen. In der Abb. 36 ist für die ausgewählten Datensätze das Verhältnis K_Q^* für die Großausführung zu K_Q in der Propellerfreifahrt für die Fortschrittsziffer, bei der im Versuch der maximale Wirkungsgrad auftritt, dargestellt. Es ergibt sich ein neuer Maßstabsfaktor für die K_Q -Umrechnung nach Propellerfreifahrtversuchen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl.

$$m_{P-Freif} = 1,05 - 0,35 / (R_n / 10^5 + 0,8)$$

Zum Vergleich sind auch hier die bisher verwendeten Formeln VBD-Alt (1) und VBD-Alt (2) eingetragen.



4.4 Maßstabseffekt aus den Propulsionsversuchen

Ähnlich wie bei der Umrechnungsfunktion für die Propellerfreifahrtversuche kann bei den Propulsionsversuchen vorgegangen werden. Die aus den Modelluntersuchungen gewonnenen Drehmomentbeiwerte K_Q und die durch Anwendung der Schubidentität bestimmten hochgerechneten Drehmomentbeiwerte K_Q^* bilden, miteinander ins Verhältnis gesetzt, den Propellermaßstabseffekt $m_P = K_Q^*/K_Q$. Für die reinen Propulsionsversuche mit den vier Modellen der Geosimserie sind in Abb. 37 diese Größen über der Reynoldszahl aufgetragen. Man sieht, daß im Propulsionsversuch die Reynoldszahlen niedriger liegen, als bei den Propellerfreifahrten. Zusätzlich sind als dünn gezogene Linien die im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Kurven für den Maßstabseffekt eingetragen. Es ist festzustellen, daß durch die Formeln der Maßstabsfaktor überzeichnet dargestellt wird. Die dick ausgezogene Kurve hingegen kann als gute Approximation der in den Propulsionsversuchen gewonnenen Maßstabsfaktoren angesehen werden. Die Formel hierzu lautet:

$$m_P = 1,0255 - 0,138 / (R_n / 10^5 + 0,42)$$

Durch diese Darstellung ist allein die Abhängigkeit von der Reynoldszahl erfaßt. In Abb. 38, die eine Detailvergrößerung der Abb. 37 ist, wird versucht, den Einfluß des Modellmaßstabs darzustellen. Ausgehend von der oben angeführten Formel wurde der Maßstabseinfluß mit aufgenommen, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß der Korrekturfaktor für kleinere Modelle größer anzusetzen ist, als für Modelle in geringerem Maßstab. Dieser zusätzliche Einfluß wird durch

$$m_{P-Lambda} = 1,023 - 0,125 / (R_n / 10^5 + 9 / Lambda)$$

erfaßt. Hier ist durch Anwendung in der Versuchspraxis nachzuprüfen, inwieweit diese neuen Formeln für den Propellermaßstabsfaktor sich bewähren. Da Sie auf der Basis systematischer Modellversuche gewonnen wurden, ist zu erwarten, daß sie einen Fortschritt in der Prognosegenauigkeit bei Propulsionsversuchen für Binnenschiffe erbringen.



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Propellergeometrie	
Abb. 2	Flügelprofile	
Abb. 3	Reynoldszahlen in den Freifahrtversuchen	
Abb. 4	Spantenriß des Binnenschiffsmodells	
Abb. 5	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 6,25$
Abb. 6	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 10$
Abb. 7	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 13$
Abb. 8	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 16$
Abb. 9	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 20$
Abb. 10	Auswertung der Propellerfreifahrten	Maßstab $l = 25$
Abb. 11	Auswertung der Propulsionsversuche	Maßstab $l = 13$
Abb. 12	Auswertung der Propulsionsversuche	Maßstab $l = 16$
Abb. 13	Auswertung der Propulsionsversuche	Maßstab $l = 20$
Abb. 14	Auswertung der Propulsionsversuche	Maßstab $l = 25$
Abb. 15	KTJ0	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 16	KQJ0	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 17	KTSJ0	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 18	KQSJ0	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 19	ETAMX	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 20	ETASMX	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 21	KQSJ0/KQJ0	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 22	ETASMX/ETAMX	Maßstab (Alle Datensätze)
Abb. 23	KTJ0	Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 24	KQJ0	Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 25	KTSJ0	Reynoldszahl (Alle Datensätze)



Abb. 26	KQSJ0		Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 27	ETAMX		Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 28	ETASMX		Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 29	KQSJ0/KQJ0		Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 30	ETASMX/ETAMX		Reynoldszahl (Alle Datensätze)
Abb. 31	KQSJ0/KQJ0		Reynoldszahl (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 32	ETASMX/ETAMX		Reynoldszahl (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 33	ETAmitt/ETSAMX		Reynoldszahl (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 34	ETASMX/ETAMX		Drehzahl für die Großausführung (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 35	Verhältnis der Wirkungsgrade		Reynoldszahl (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 36	Verhältnis der Drehmomentbeiwerte im Bereich von ETAMax		Reynoldszahl (Ausgewählte Datensätze)
Abb. 37	Maßstabseffekt aus Propulsionsversuchen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl		
Abb. 38	Maßstabseffekt aus Propulsionsversuchen, zusätzliche Abhängigkeit vom Modellmaßstab		



Symbolverzeichnis

A	m^2	Fläche allgemein	
A_e	m^2	Projizierte Propellerflügelfläche	
A_0	m^2	Propellerkreisfläche	$A_0 = p \cdot D^2 / 4$
a_e / a_0	-	Flächenverhältnis des Propellers	
B	m	Schiffsbreite	
$B_{\text{üa}}$	m	Breite über alles	
C_{Th}	-	Schubbelastungsgrad	$C_{\text{Th}} = \frac{T}{r / 2 \cdot u_a^2 \cdot A_0}$
c_{07R}	m	Profillänge des Propellerblatts, gemessen bei 70% des Radius	
D	m	Propellerdurchmesser	
g	m/s^2	Erdbeschleunigung	
J	-	Fortschrittsgrad des Propellers	$J = \frac{u_p}{n \cdot D}$
J_{max}	-	Fortschrittsgrad des Propellers, bei dem K_T zu Null wird	
K_Q	-	Momentenbeiwert des Propellers	$K_Q = \frac{Q}{r \cdot n^2 \cdot D^5}$
K_Q^*	-	Momentenbeiwert des Propellers, hochgerechnet auf die Großausführung	
K_T	-	Schubbeiwert des Propellers	$K_T = \frac{T}{r \cdot n^2 \cdot D^4}$
K_T^*	-	Schubbeiwert des Propellers, hochgerechnet auf die Großausführung	
L	m	Schiffslänge	
L_{pp}	m	Länge zwischen den Loten	
m	kg	Masse	
m_p	-	Propellermaßstabsfaktor	
n	1/s	Propellerdrehrate	
n_p	-	Anzahl Propeller	
P_D	W	Propellerdrehleistung im Propulsionsversuch	
P_E	W	Schleppeleistung im Widerstandsversuch	
Q	Nm	Propellerdrehmoment	
R	m	Radius des Propellers	
R_T	N	Widerstand (Schiffskraft in x-Richtung)	



R_n	-	Reynoldszahl	$R_n = \frac{V \cdot L_{pp}}{n}$
R_{np}	-	Reynoldszahl des Modellpropellers	$R_{np} = \frac{u_{07R} \cdot c_{07R}}{n}$
T	m	Mittlerer Tiefgang	
T	N	Propellerschub	
t	-	Sogziffer	$t = (T - R_T)/T$
u_a	m/s	Anströmgeschwindigkeit des Propellers in x -Richtung (axial)	$u_a = V \cdot (1 - w)$
u_r	m	Umfangsgeschwindigkeit des Propellers bei 0.7 des Radius (radial)	$u_r = 0.7 \cdot 2p \cdot n \cdot R$
u_{07R}	m	Anströmgeschwindigkeit des Profils bei 0.7 des Radius	$u_{07R} = \sqrt{u_a^2 + u_r^2}$
V	m/s	Schiffsgeschwindigkeit	
w	-	Nachstromziffer	
h	-	Wirkungsgrad allgemein	
h_0		Propellerwirkungsgrad	$h_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2p}$
h_0^*	-	Propellerwirkungsgrad, hochgerechnet auf die Großausführung	
n	m ² /s	Kinematische Zähigkeit	
r	kg/m ³	Dichte	



Literatur

Bertram, V. (1994) : *Recent Applications of Computational Fluid Dynamics*, Forum Computational Fluid Dynamics der STG, Hamburg

Collatz, G. (1976) : *Berücksichtigung der Maßstabeffekte bei der Auswertung von Propulsionsversuchen*, 11. Fortbildungskurs des Institut für Schiffbau der Universität Hamburg (IfS), Hamburg

Collatz, G. (1984) : *Schiff und Propeller, Sog und Nachstrom*, 20. Fortbildungskurs des Institut für Schiffbau der Universität Hamburg (IfS), Hamburg

Heuser, H.H. (1977) : *Bestimmung des Maßstabeffekts von Propeller-Düsen-Ruderkombinationen bei Schubbooten durch Geosim-Versuche*, VBD-Bericht Nr. 842, Duisburg

ITTC (1957) : *Proceedings 8th International Towing Tank Conference (ITTC)*, Madrid

ITTC (1975) : *Proceedings 14th International Towing Tank Conference (ITTC)*, Ottawa

ITTC (1975a) : *Report of Propeller Committee, Appendix 10*, in: *Proceedings 14th ITTC*, Ottawa

ITTC (1978) : *Proceedings 15th International Towing Tank Conference (ITTC)*, Den Haag

ITTC (1978a) : *„Report of Performance Committee“ mit Appendix*, in: *Proceedings 15th ITTC*, Den Haag

ITTC (1984) : *Proceedings 17th International Towing Tank Conference (ITTC)*, Göteborg

ITTC (1987) : *Proceedings 18th International Towing Tank Conference (ITTC)*, Kobe



ITTC (1993) : *Proceedings 20th International Towing Tank Conference (ITTC)*, San Francisco

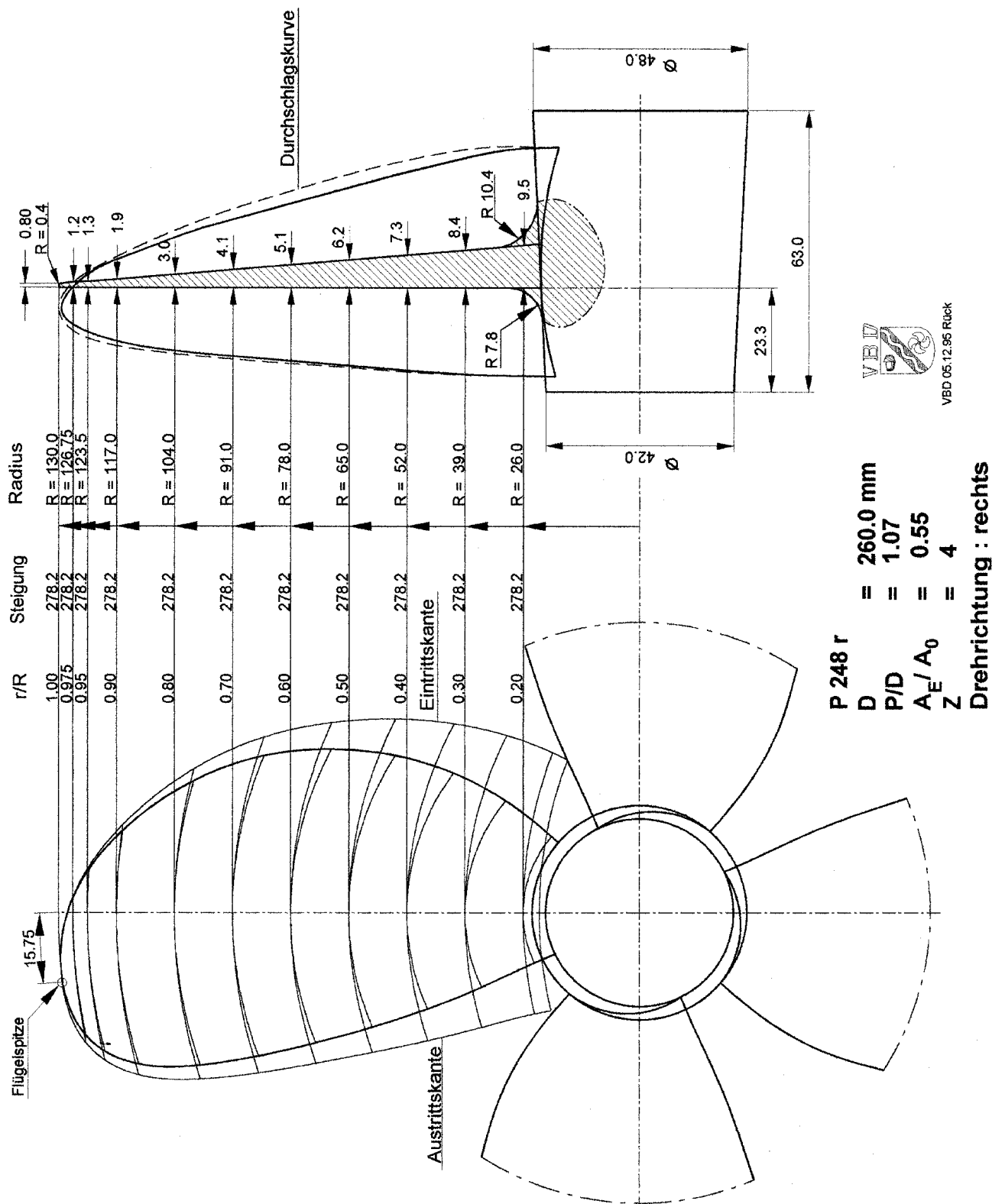
Lerbs, H.W. (1951): *On the Effects of Scale and Roughness on Free Running Propellers*, Journal of the American Society of Naval Engineers

Meyne, K. (1972) : *Untersuchung der Propellergrenzschichtströmung und der Einfluß der Reibung auf die Propellerkenngrößen*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), Band 66, Hamburg

Meyne, K. (1982) : *Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Leistungsaufnahme von Propellern*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), Band 76, Hamburg

Sturtzel, W., Helm, K. und Schäle, E. (1959) : *Versuche mit ummantelten Schraubenpropellern zur Ermittlung der Maßstab-Kennzahl*, Forschungsberichte des Landes NRW, Bericht Nr. 815, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen

Zibell, H.G. (1992) : *Bestimmung der Abhängigkeit des Formfaktors eines Einschrauben-Binnenschiffes von der Fahrwasserbreite - Kanaleffekt*, VBD-Bericht Nr. 1340, Duisburg

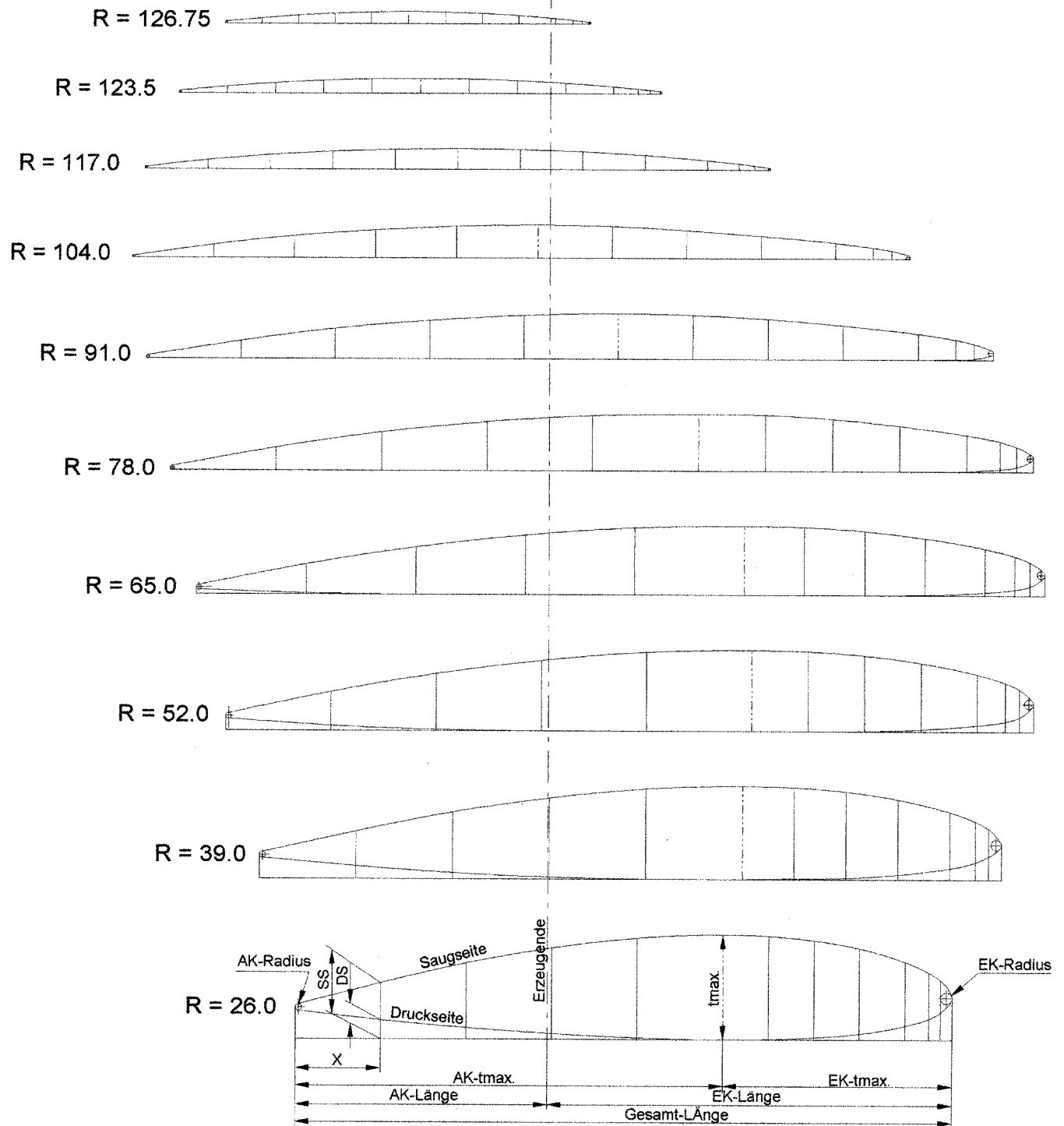


P 248 r
D = 260.0 mm
P/D = 1.07
 A_E / A_0 = 0.55
Z = 4
Drehrichtung : rechts

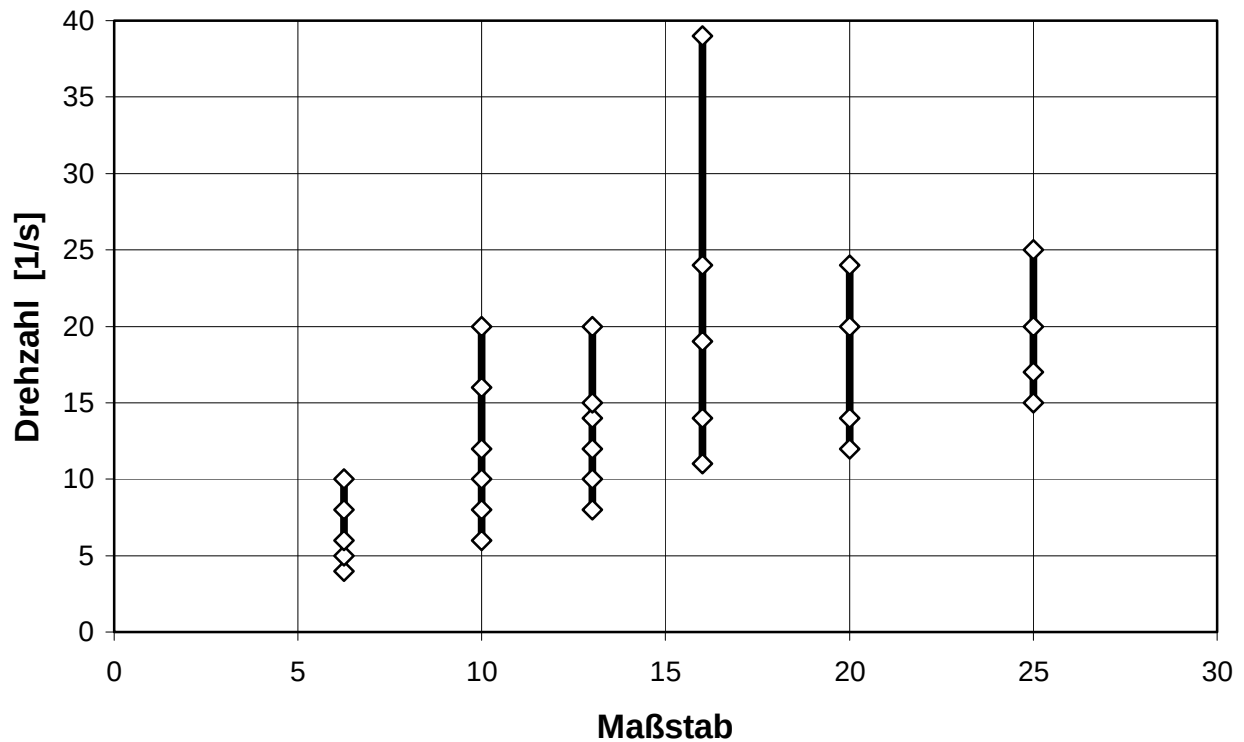
PROFILE P248



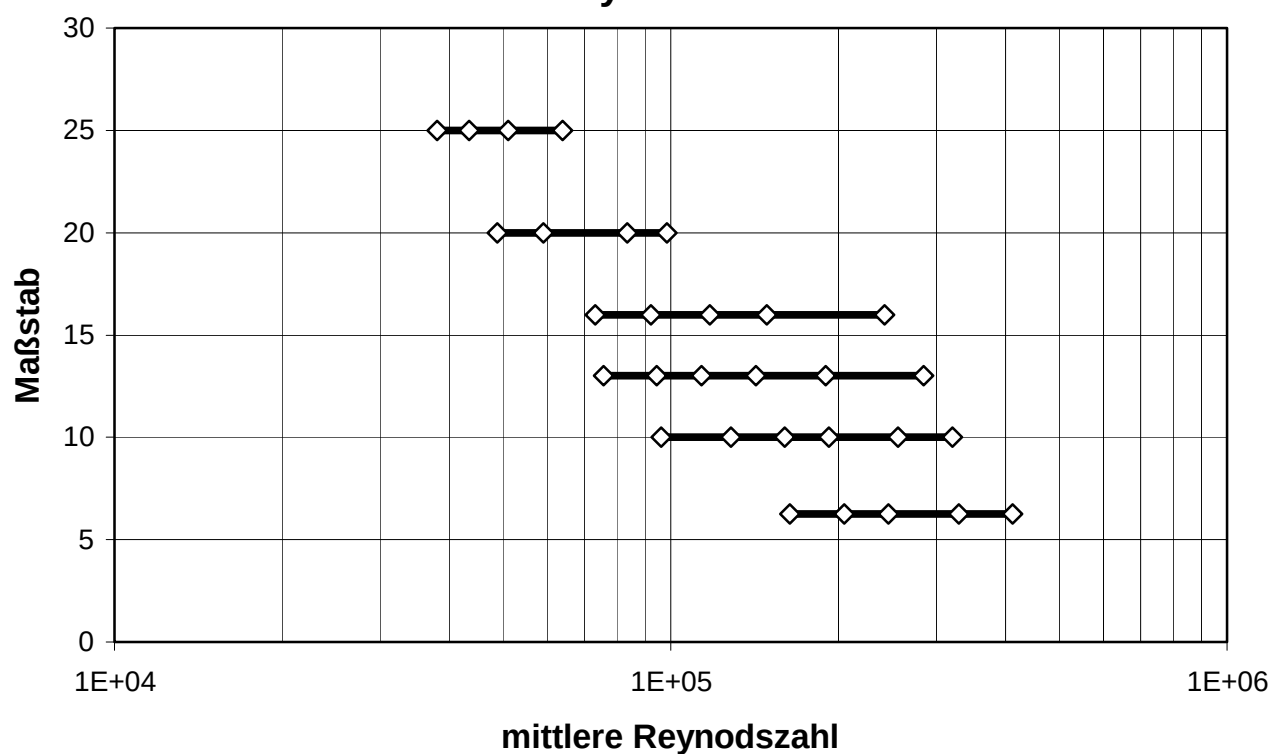
VBD 05.12.95 Rück



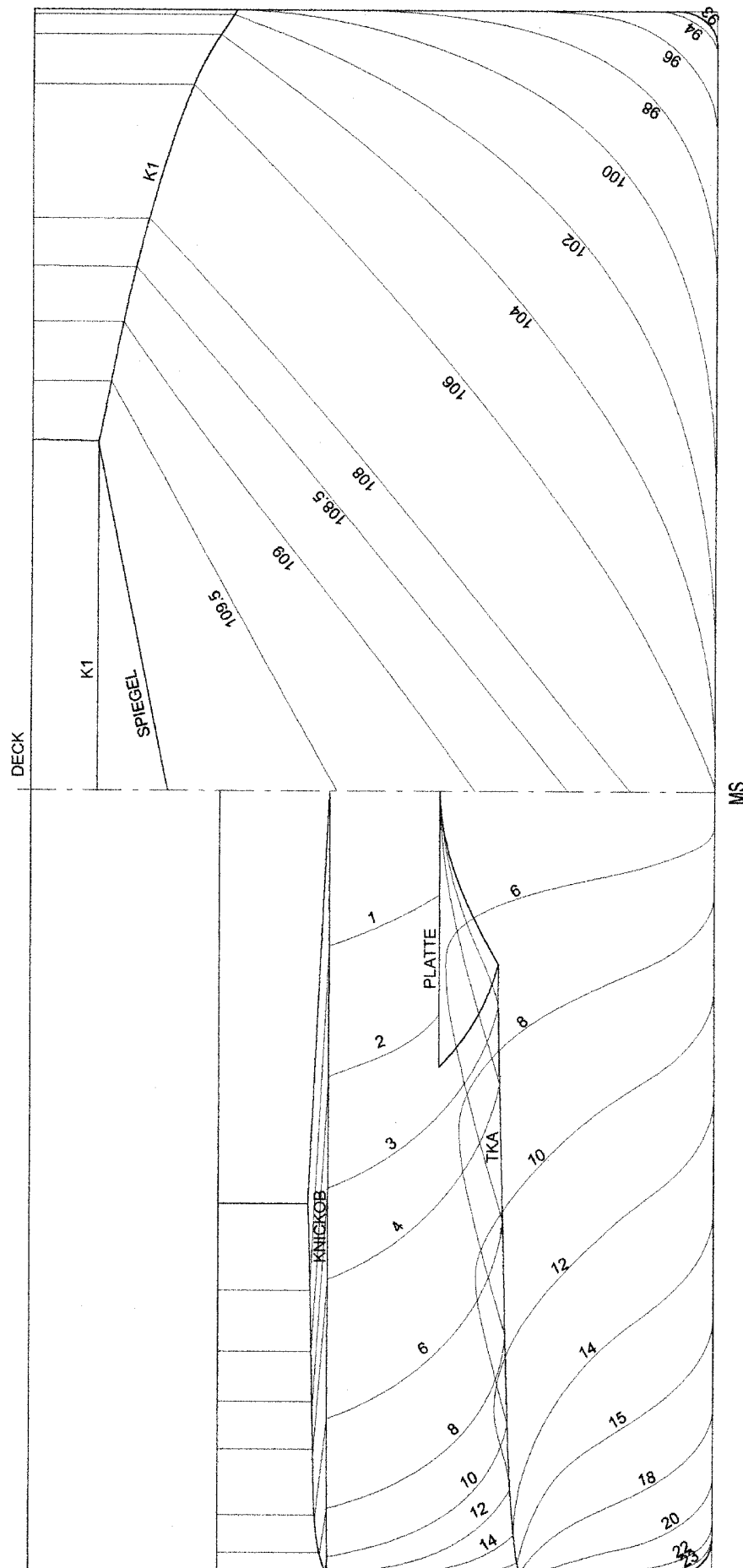
Durchgeführte Propellerfreifahrten vs. Propellermaßstab



Durchgeführte Propellerfreifahrten vs. Reynoldszahl



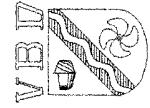
SPANTENRISS



MODELL - M1539

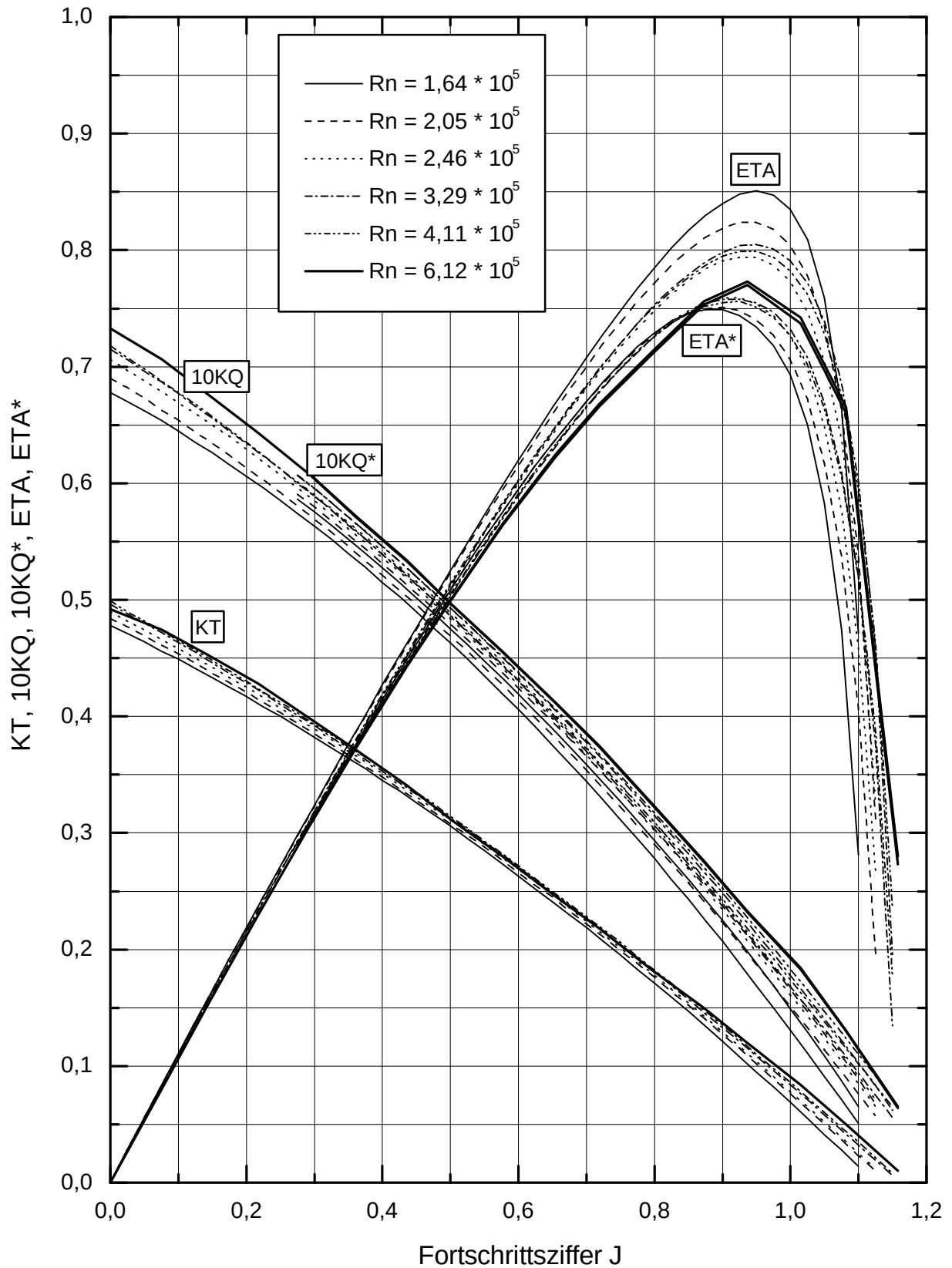
$\lambda = 12$

L = 9166,7 mm
B = 946,7 mm

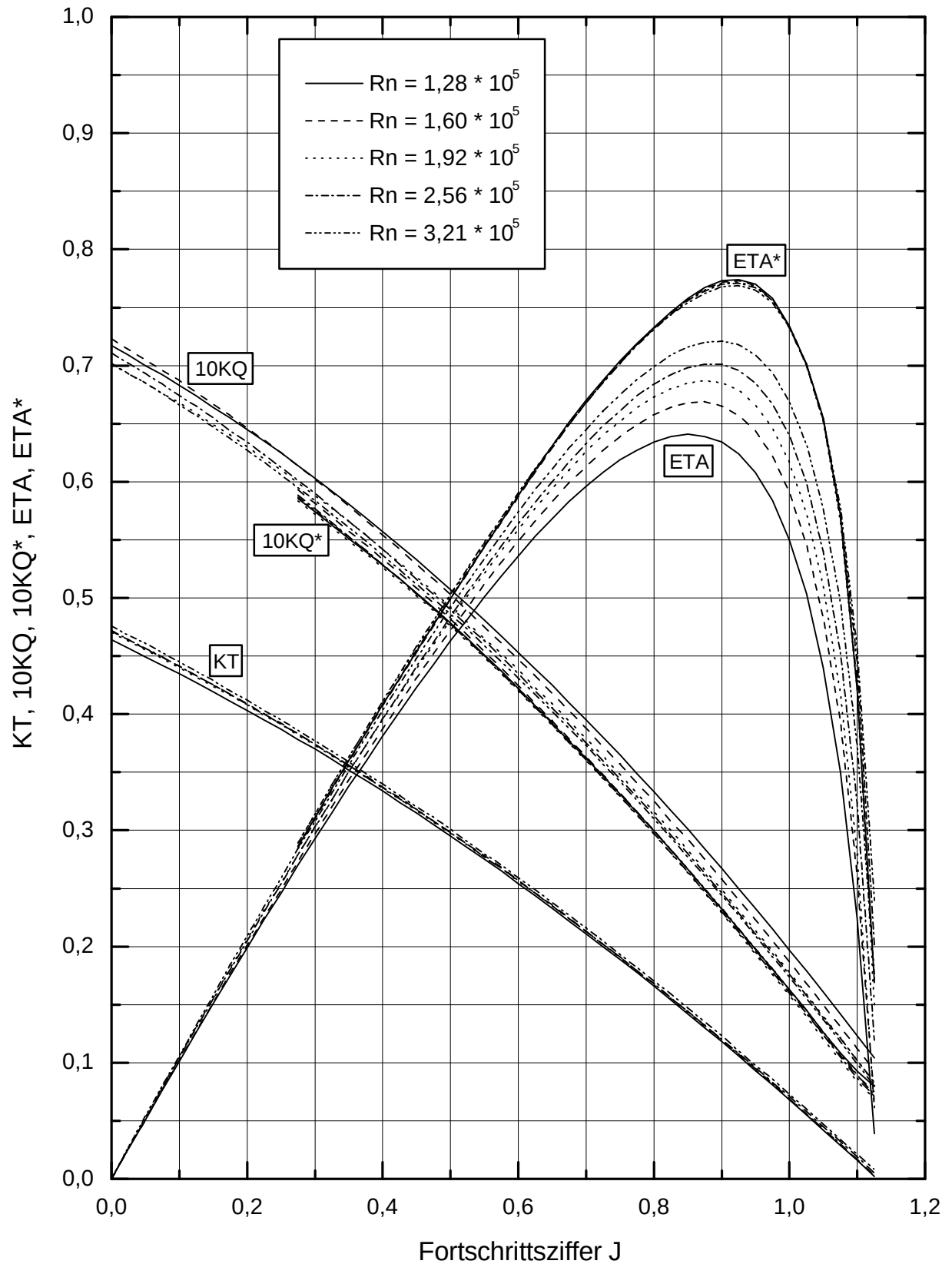


A1904
VBD. 25.10.95 RÜCK

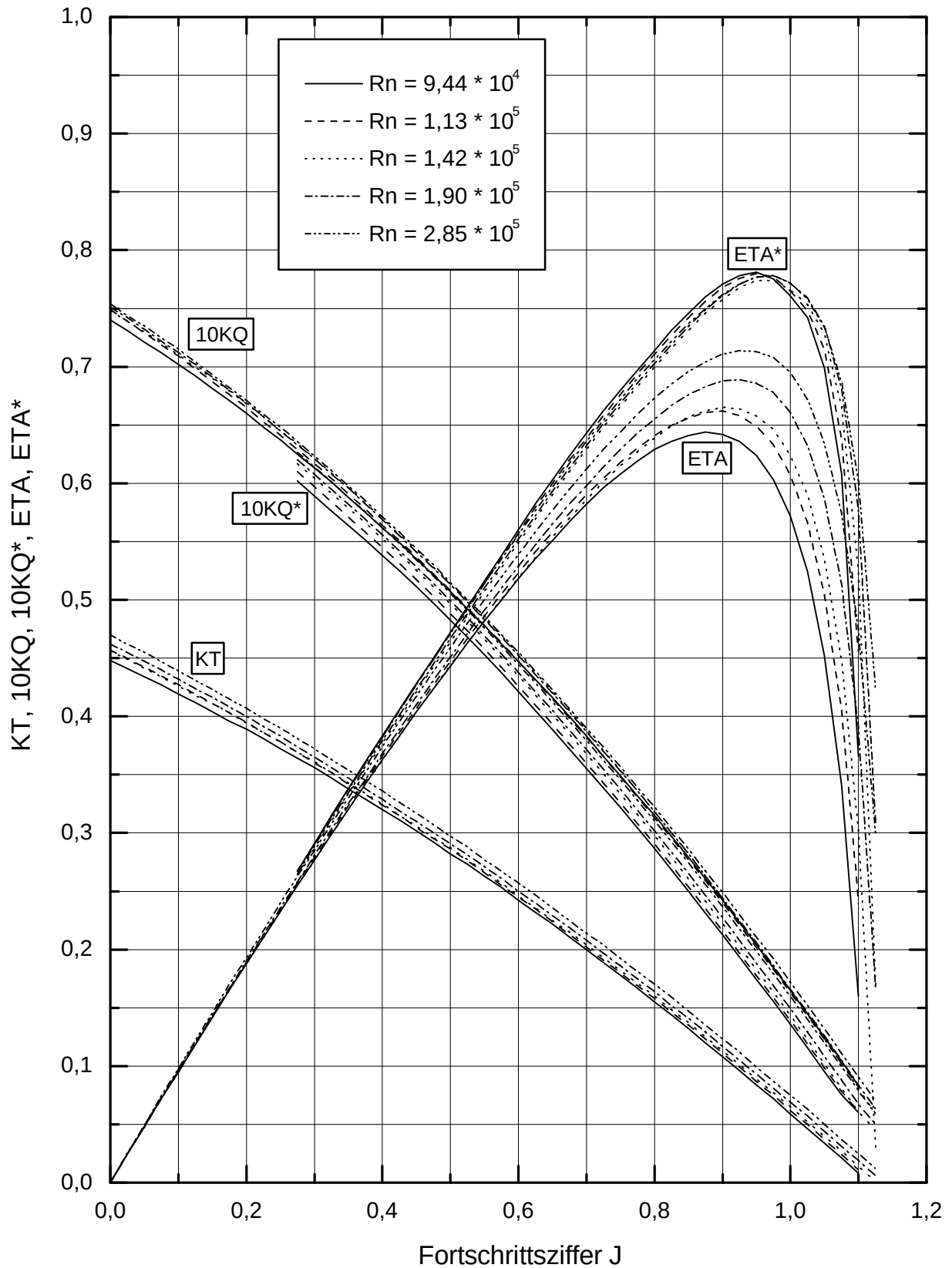
Propellerfreifahrt Maßstab 1:6,25



Propellerfreifahrt Maßstab 1:10



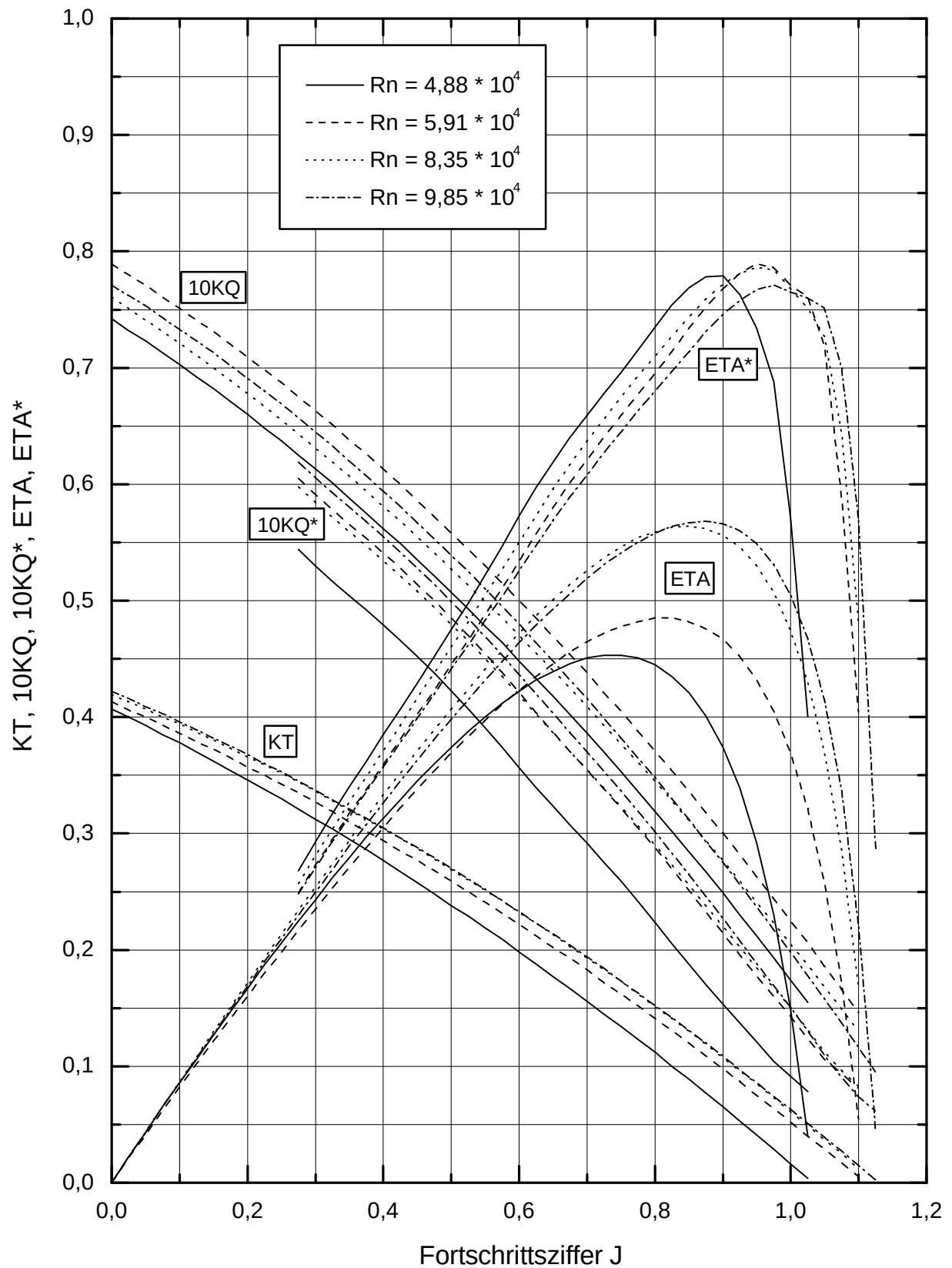
Propellerfreifahrt Maßstab 1:13



The graph plots five parameters (KT, 10KQ, 10KQ*, ETA, ETA*) against the progress number J (ranging from 0.0 to 1.2). The y-axis ranges from 0.0 to 1.0. Three Reynolds numbers (Rn) are compared: $7,32 \cdot 10^4$ (solid line), $9,21 \cdot 10^4$ (dashed line), and $2,42 \cdot 10^5$ (dotted line). The curves show that as J increases, KT increases while the other parameters generally decrease or peak and then decrease. The parameter ETA* shows a sharp peak around J = 0.9.

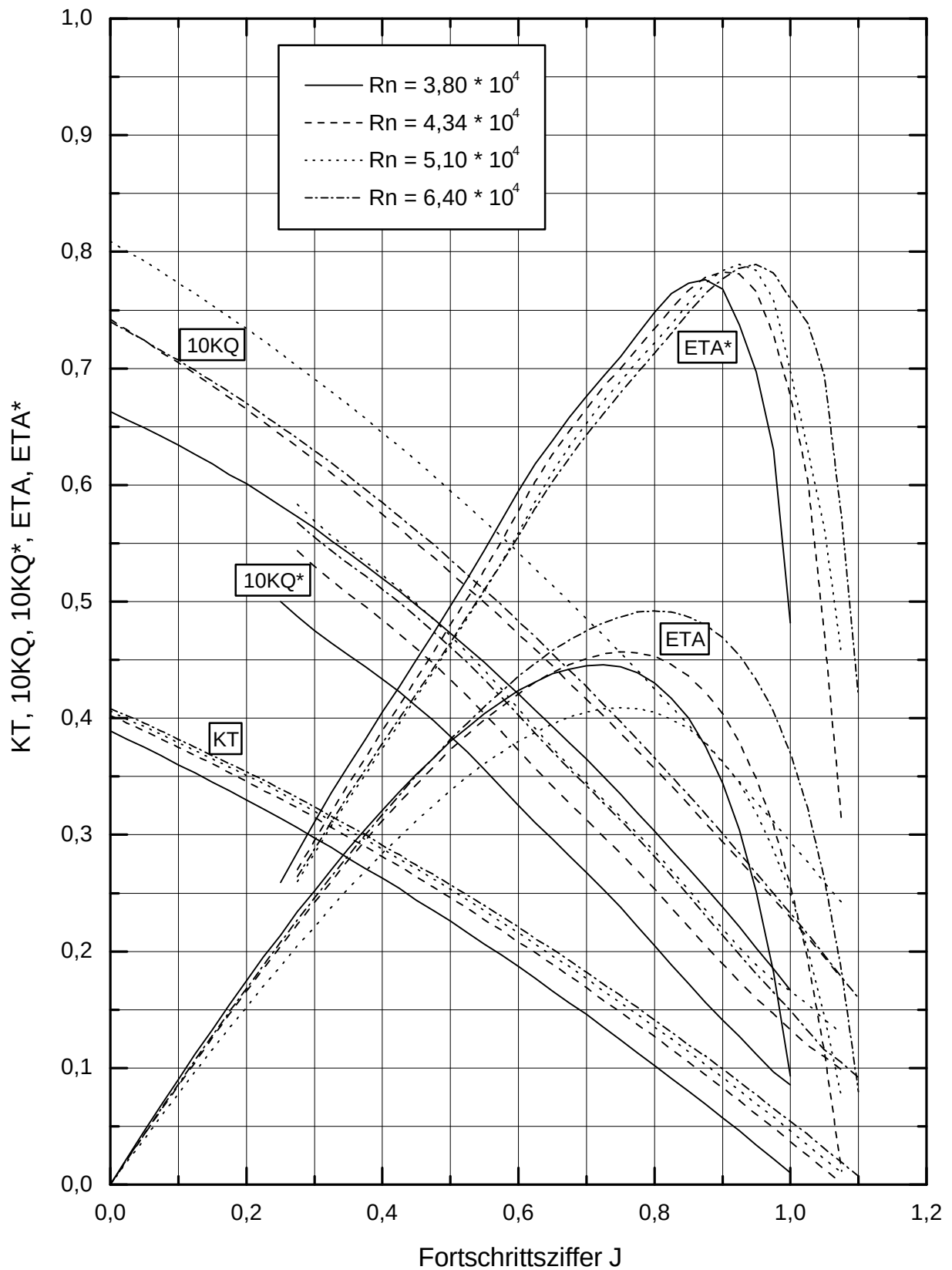


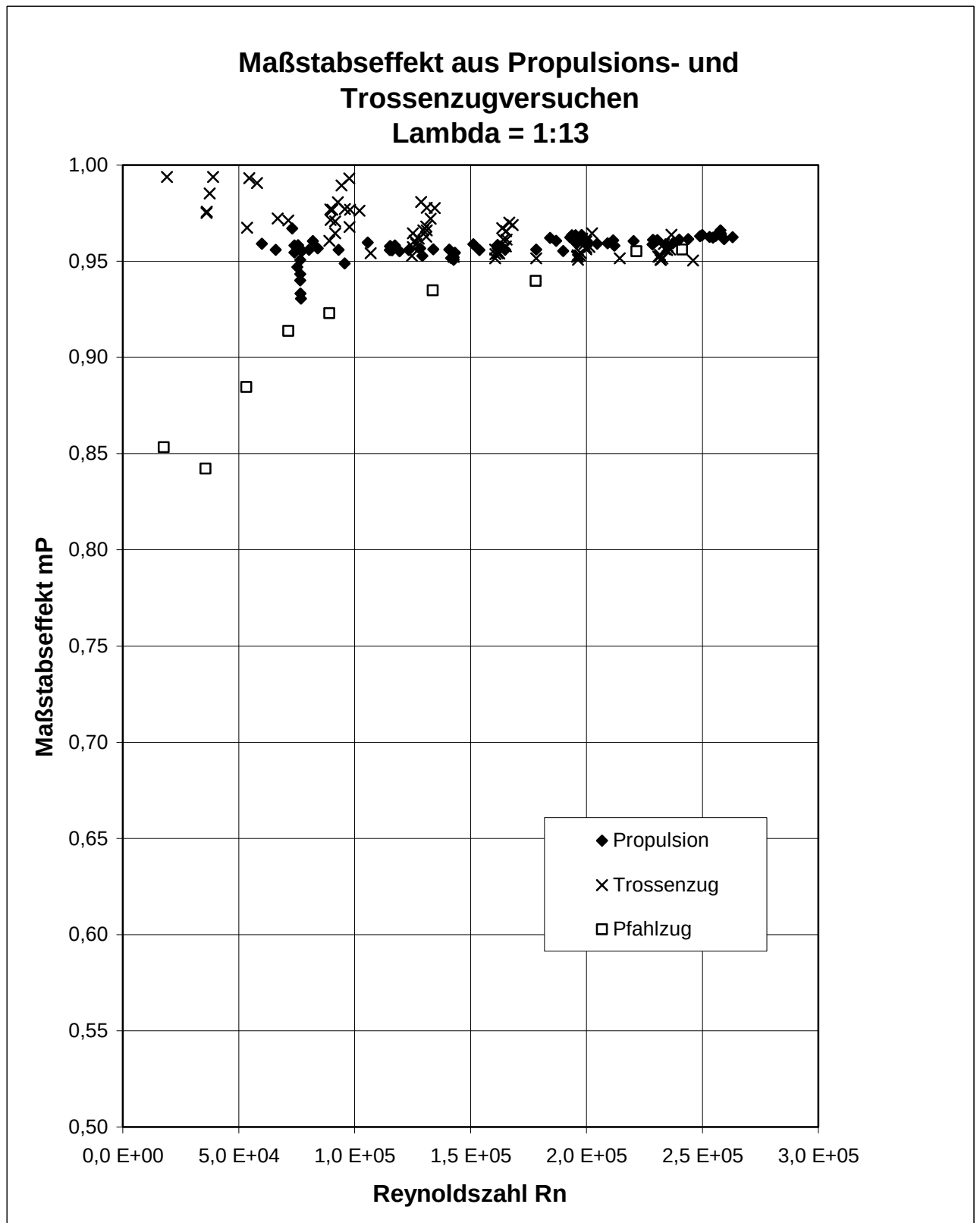
Propellerfreifahrt Maßstab 1:20

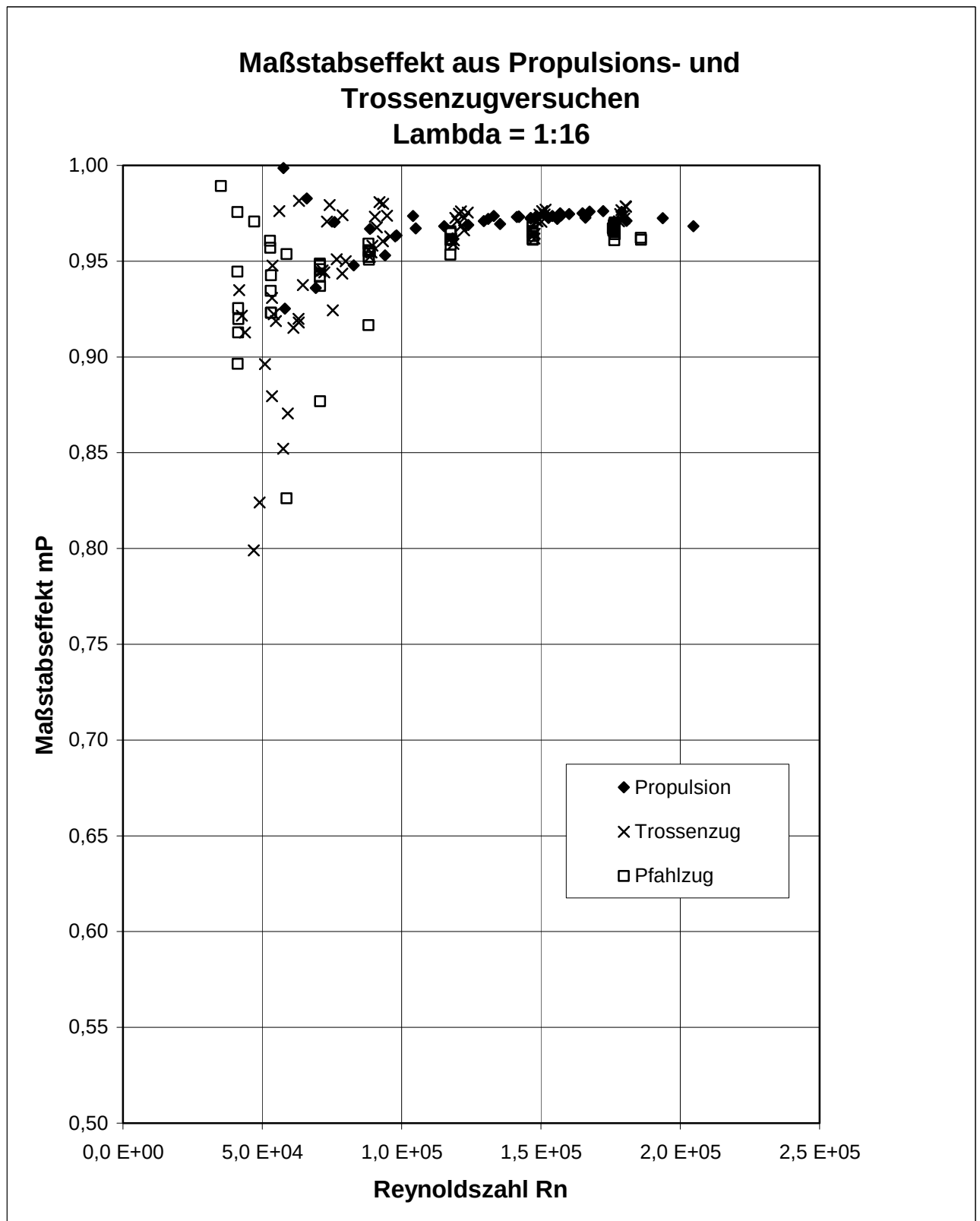


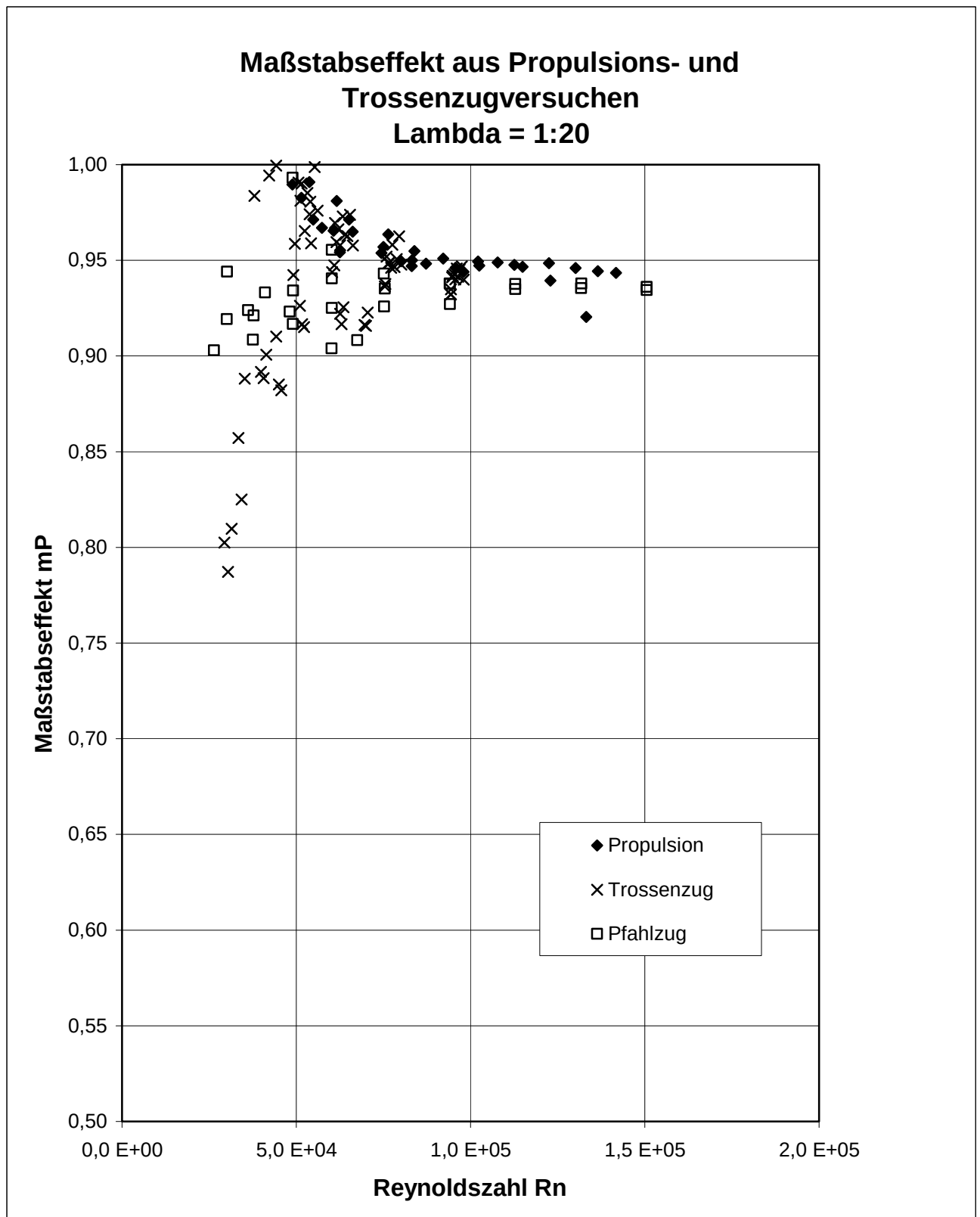


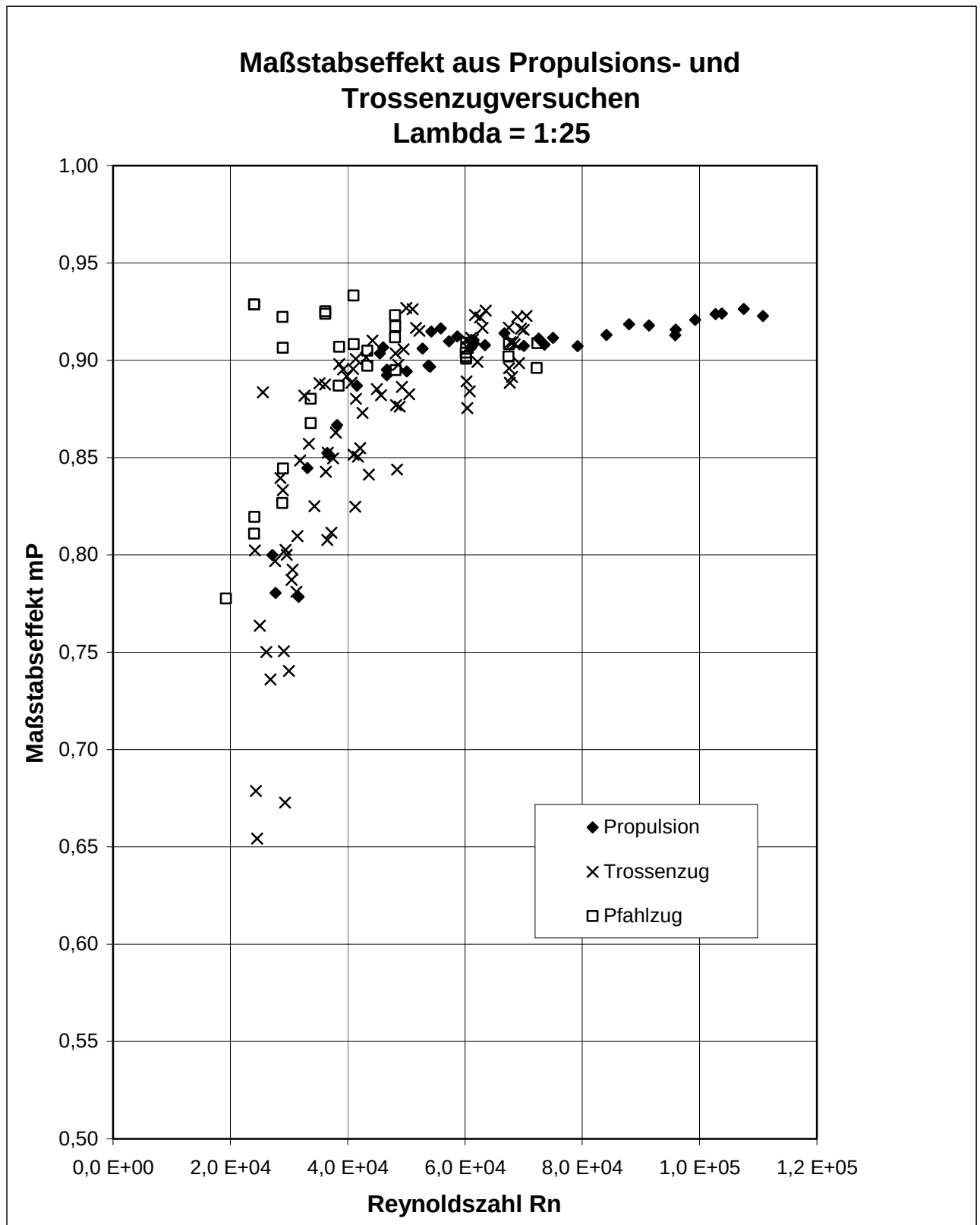
Propellerfreifahrt Maßstab 1:25

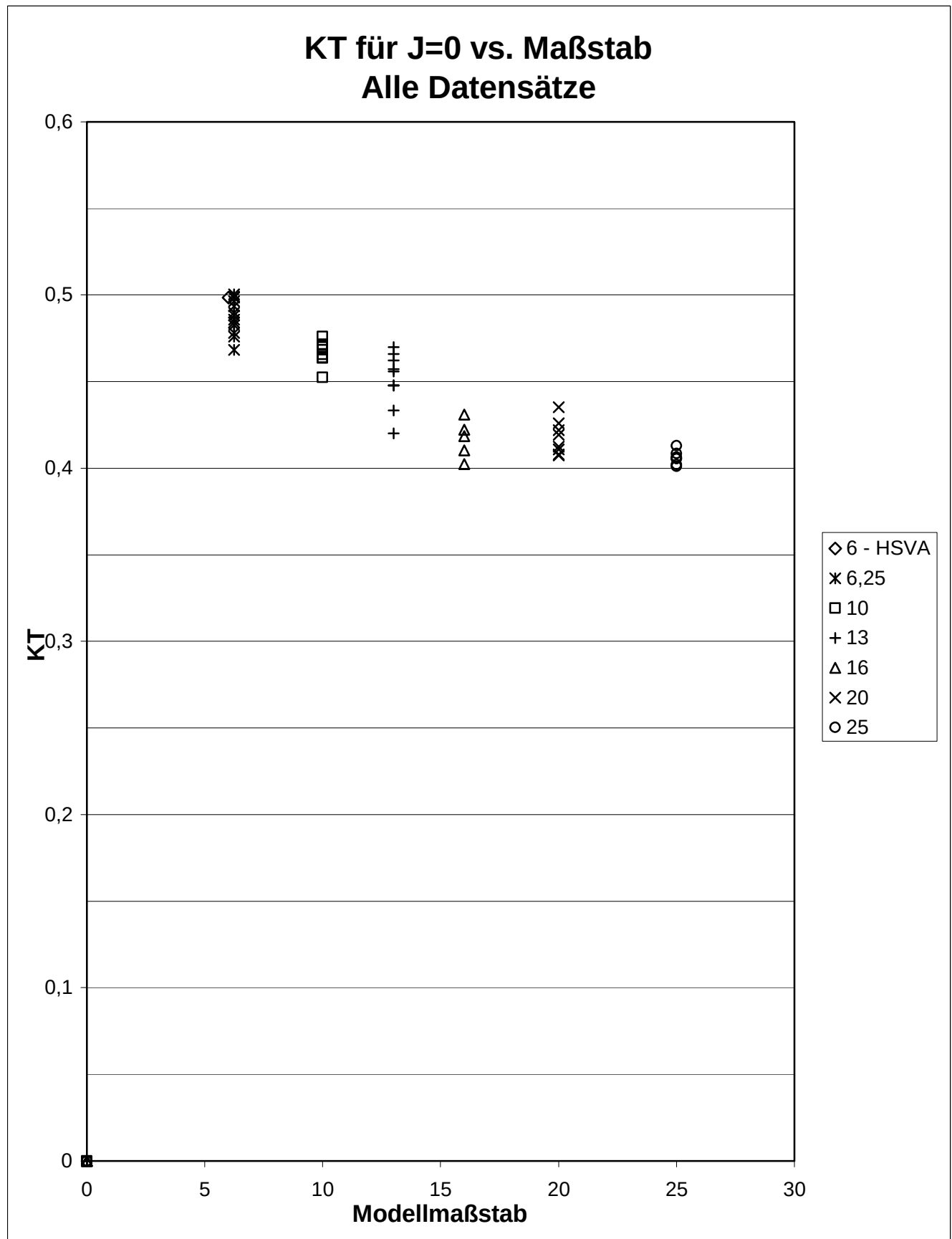


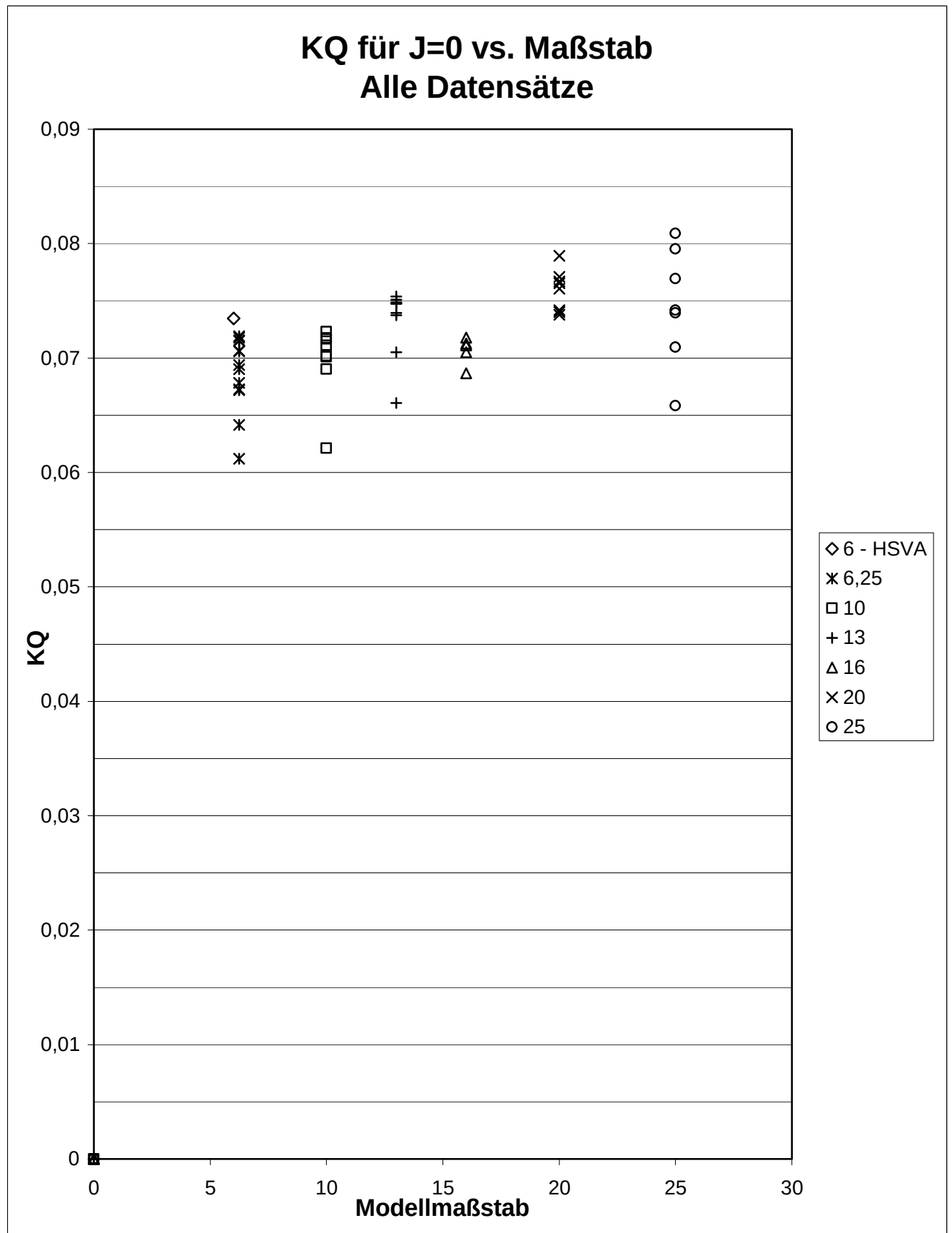


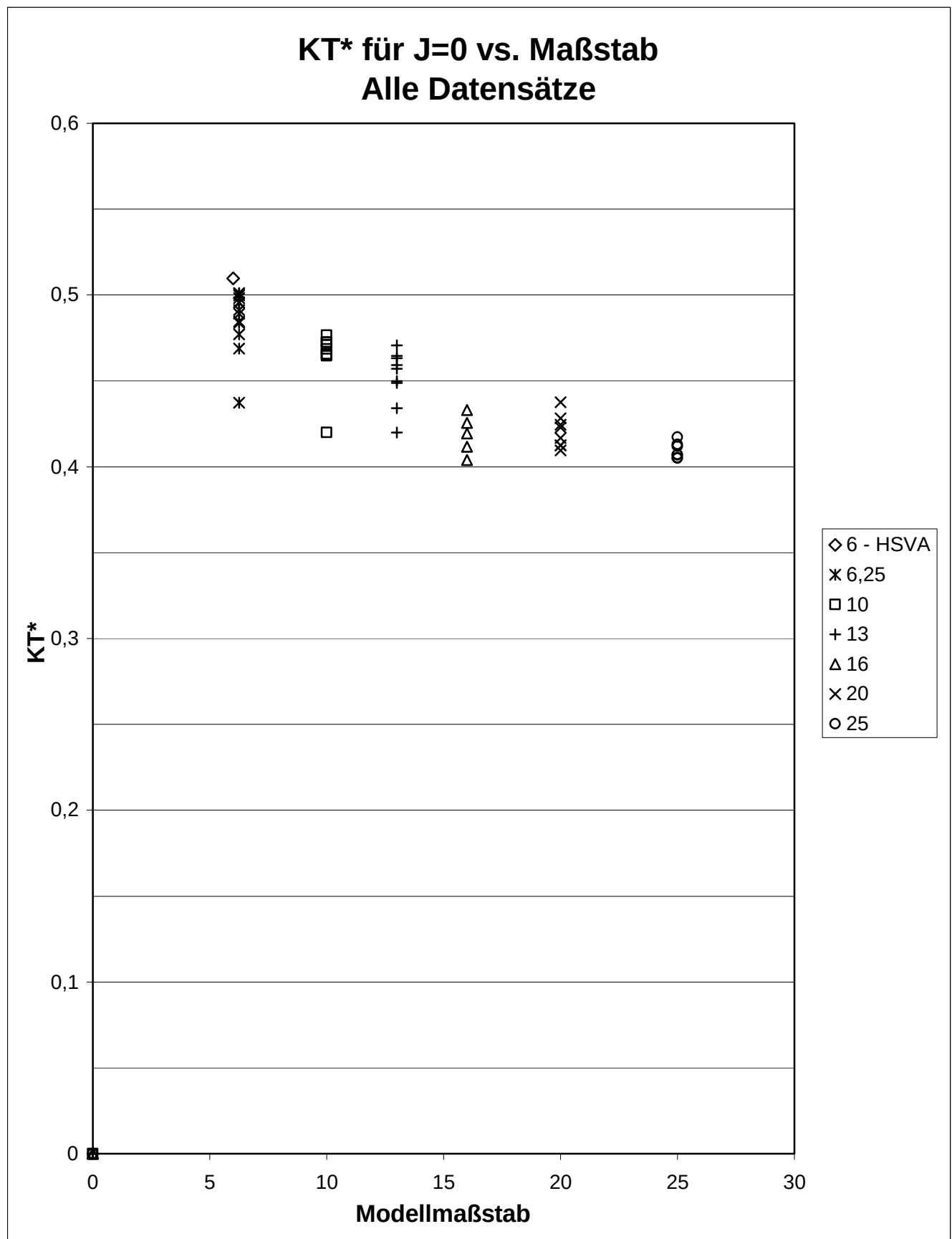


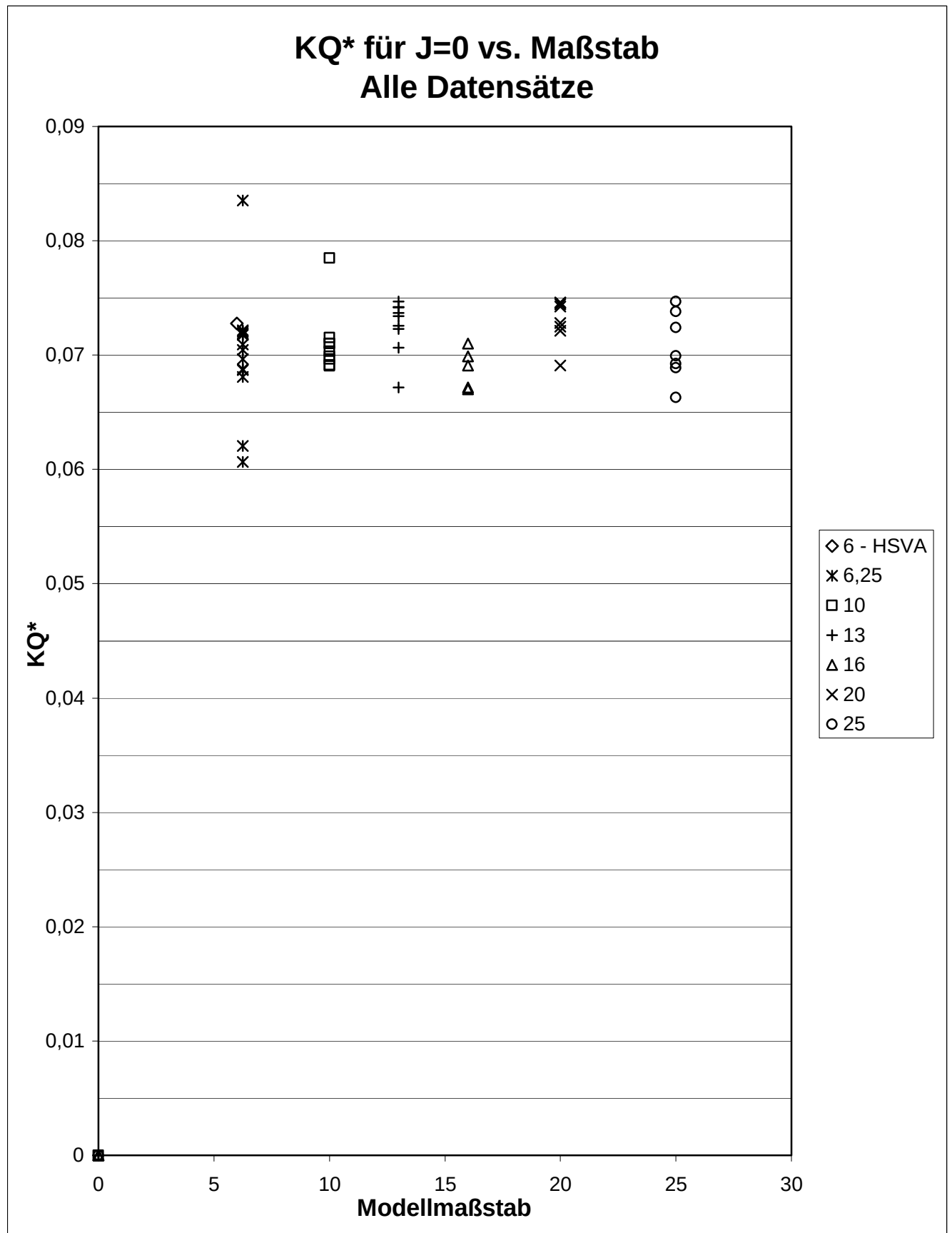


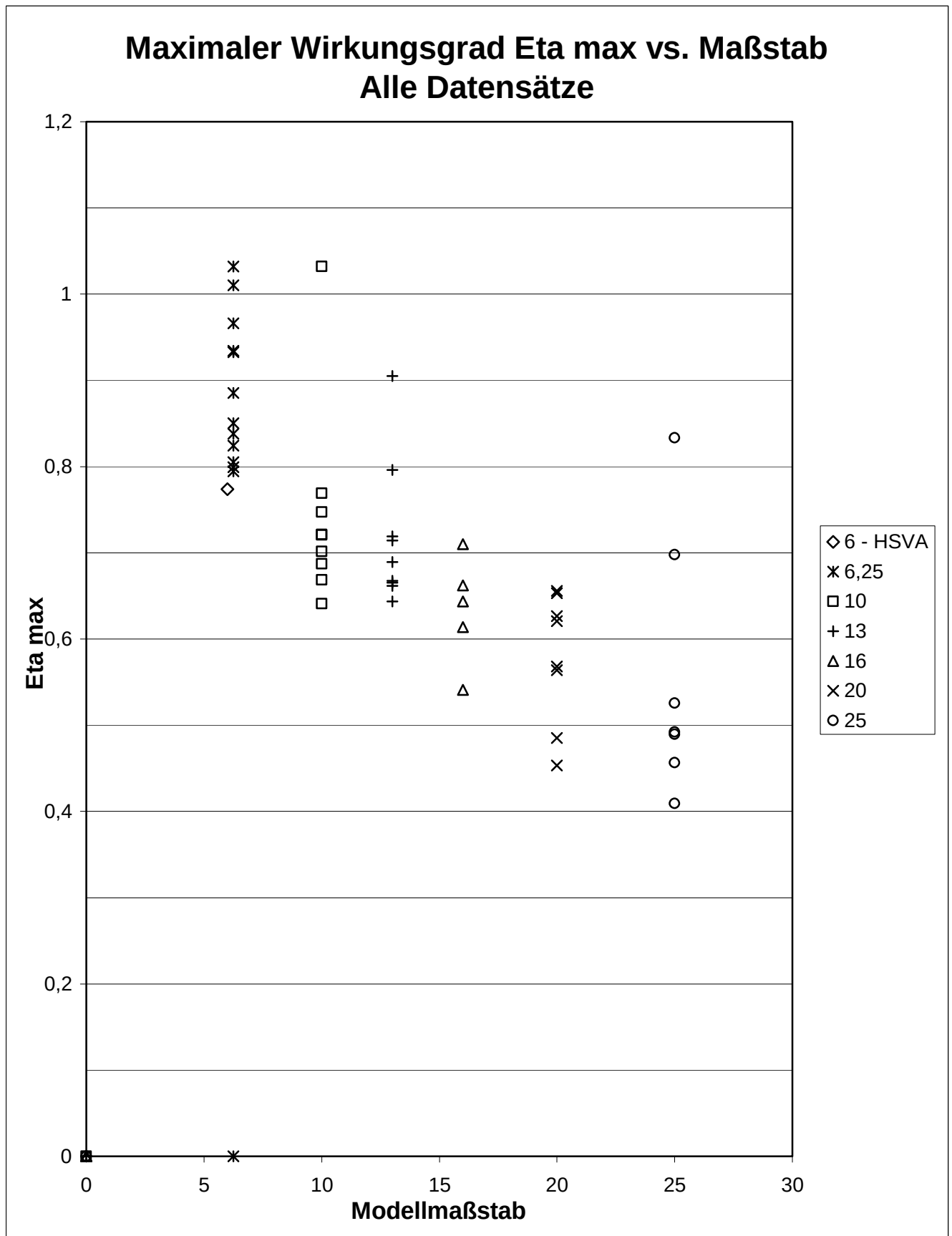






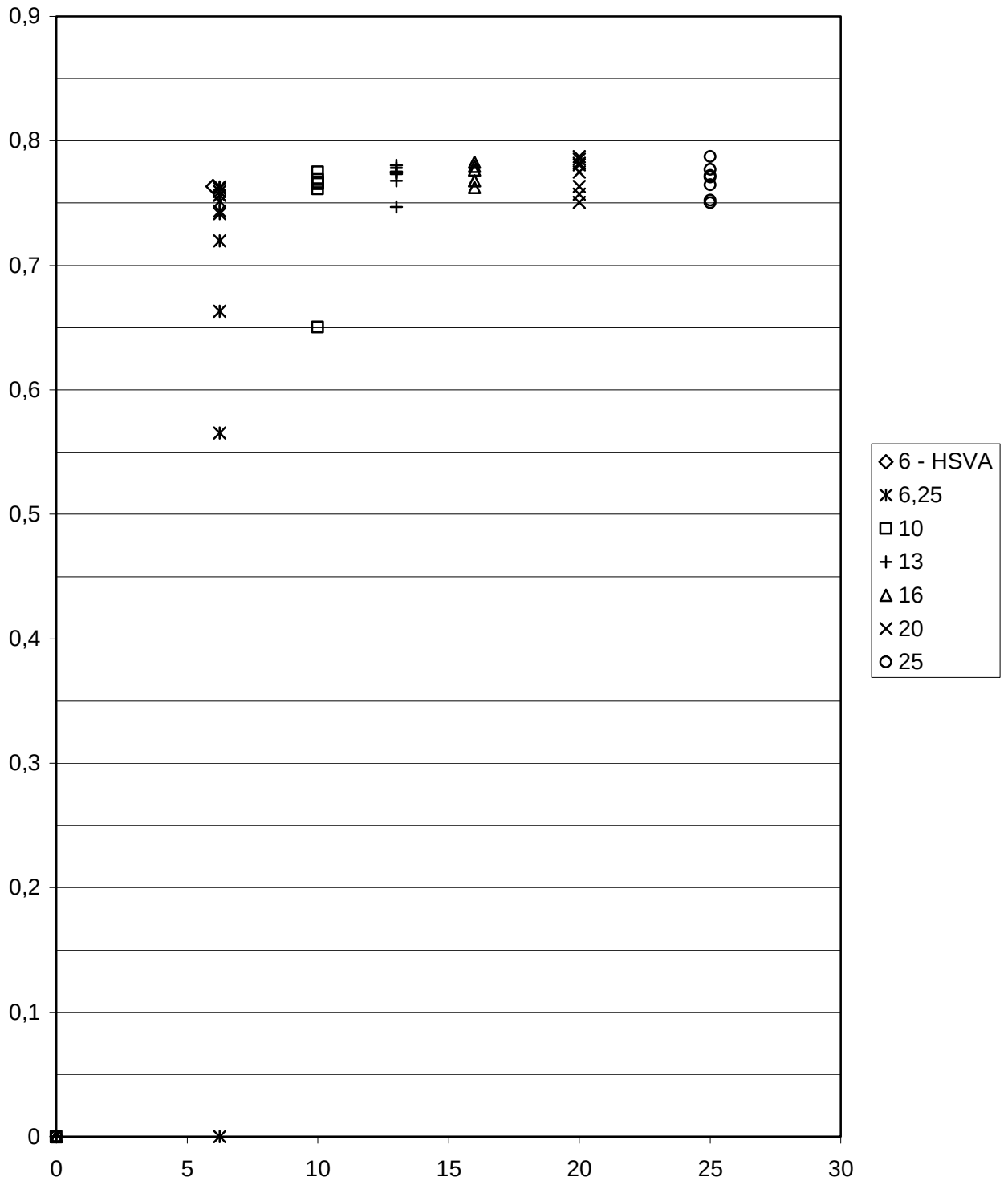


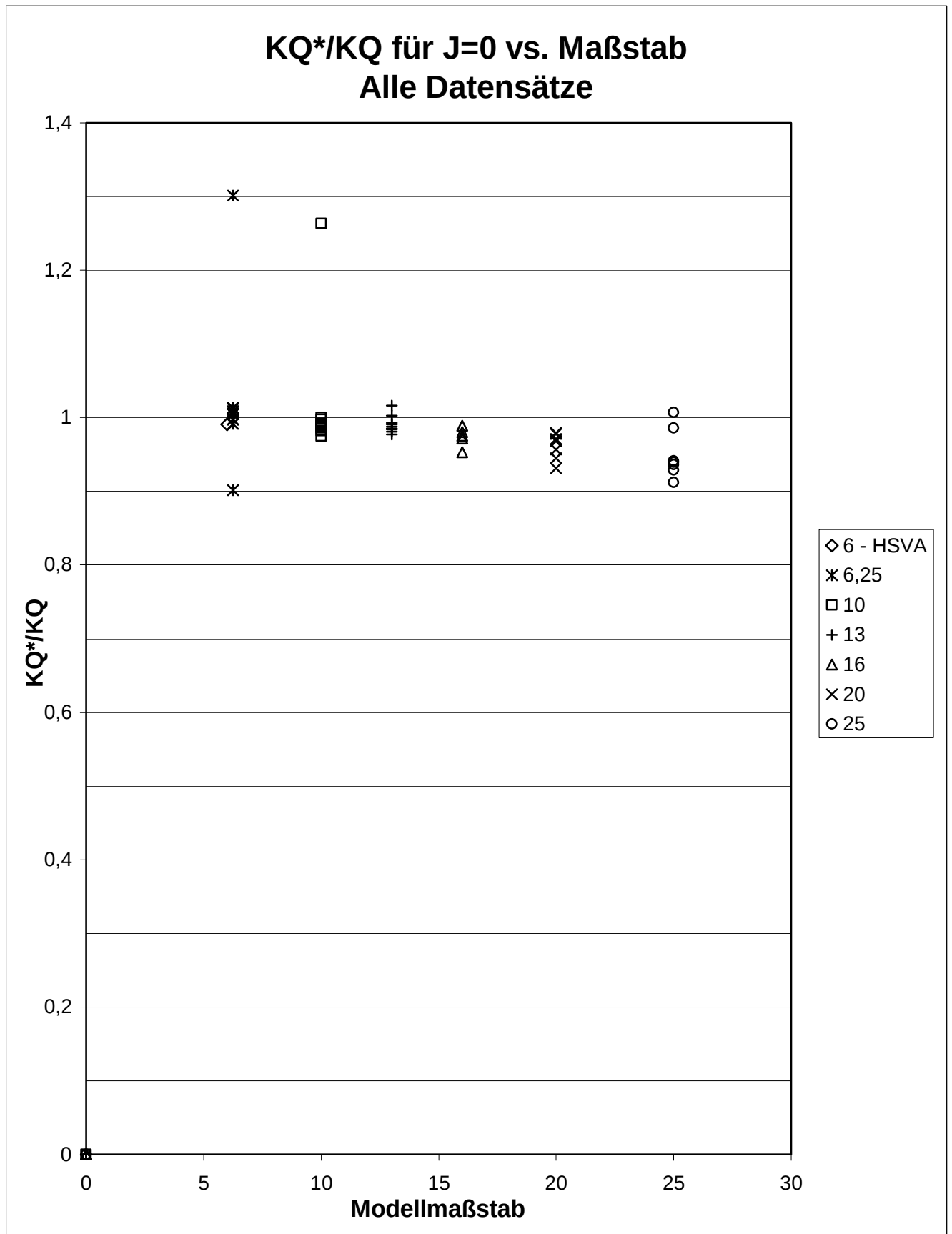


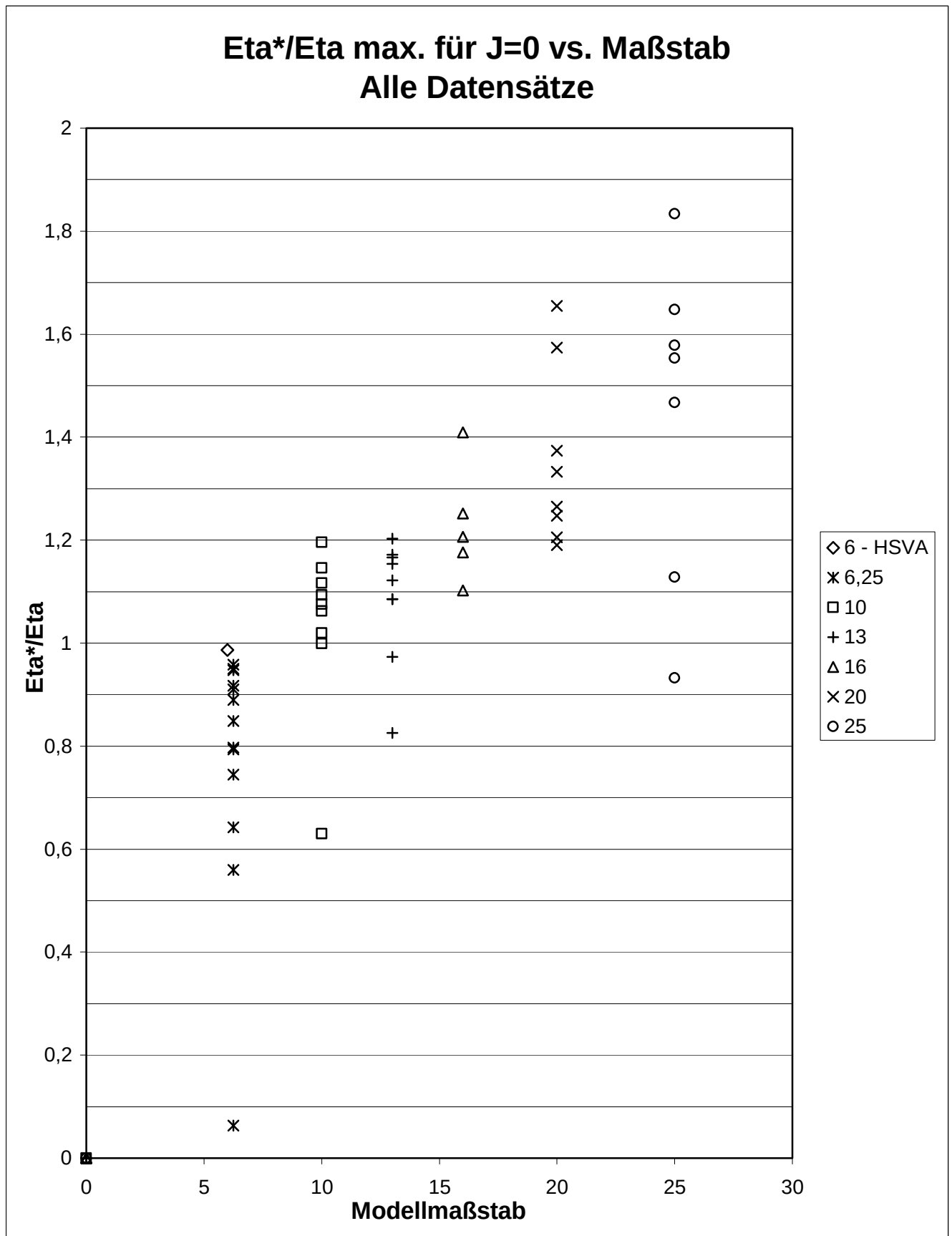


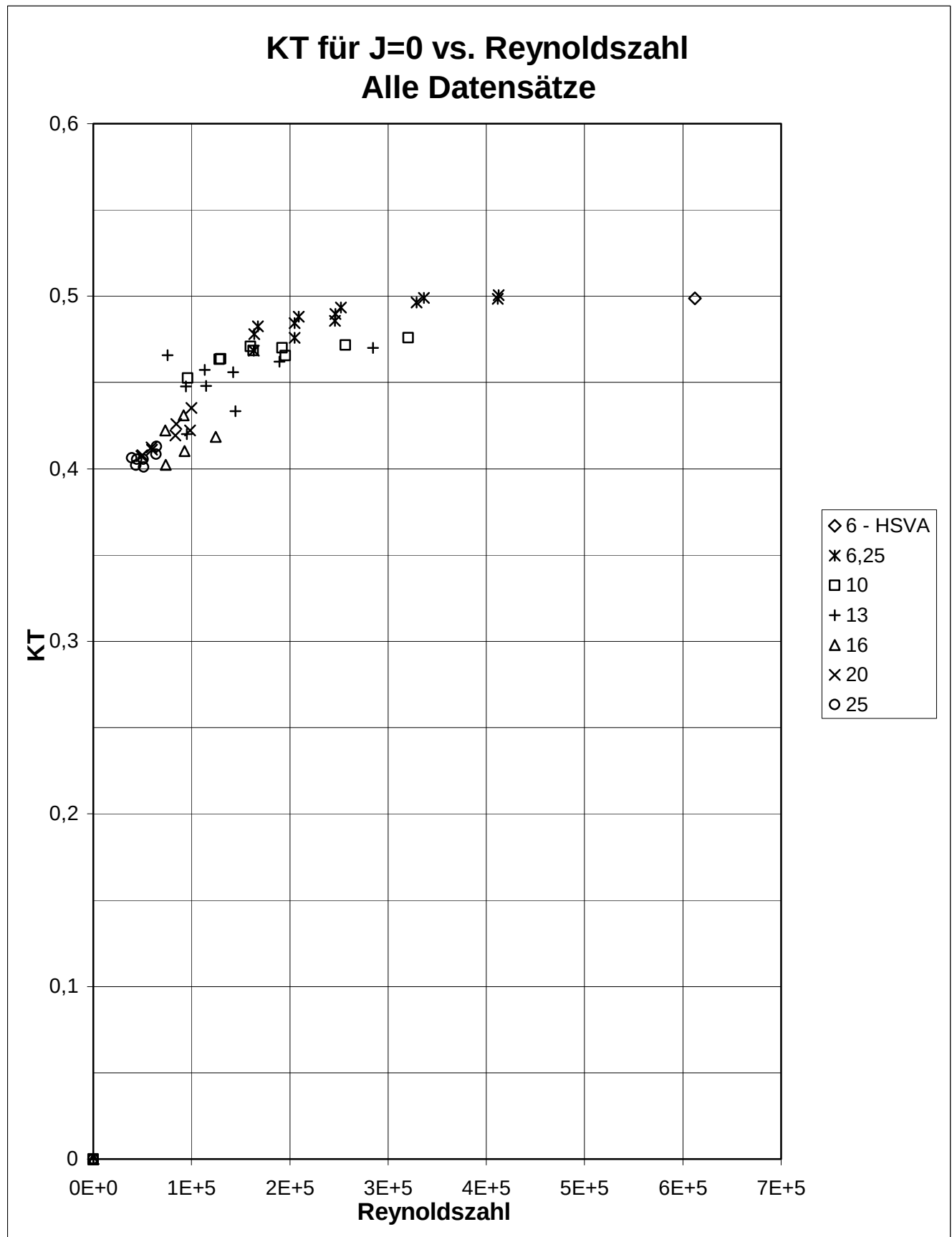
Maximaler Wirkungsgrad $\eta^*_{\max}$ vs. Maßstab

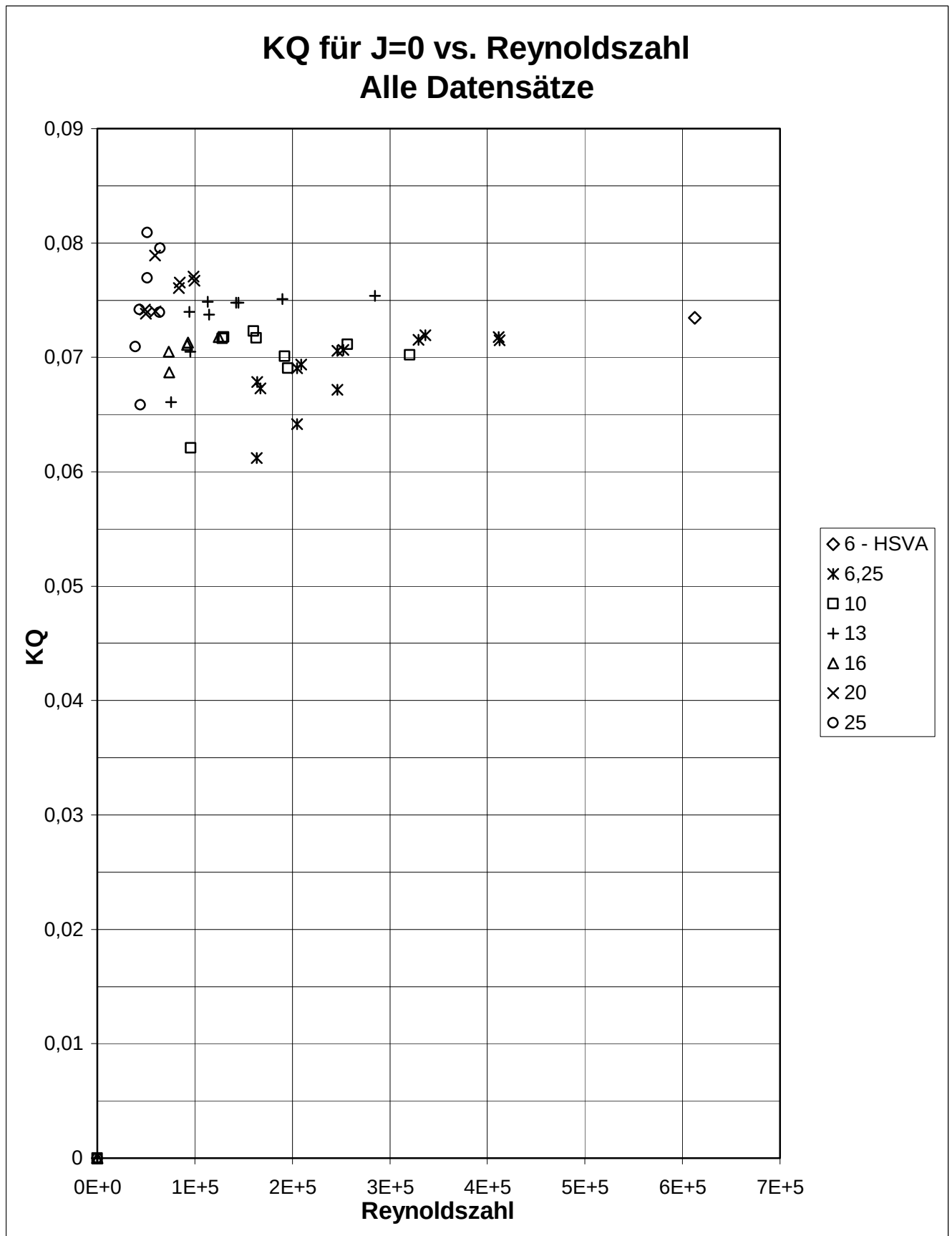
Alle Datensätze



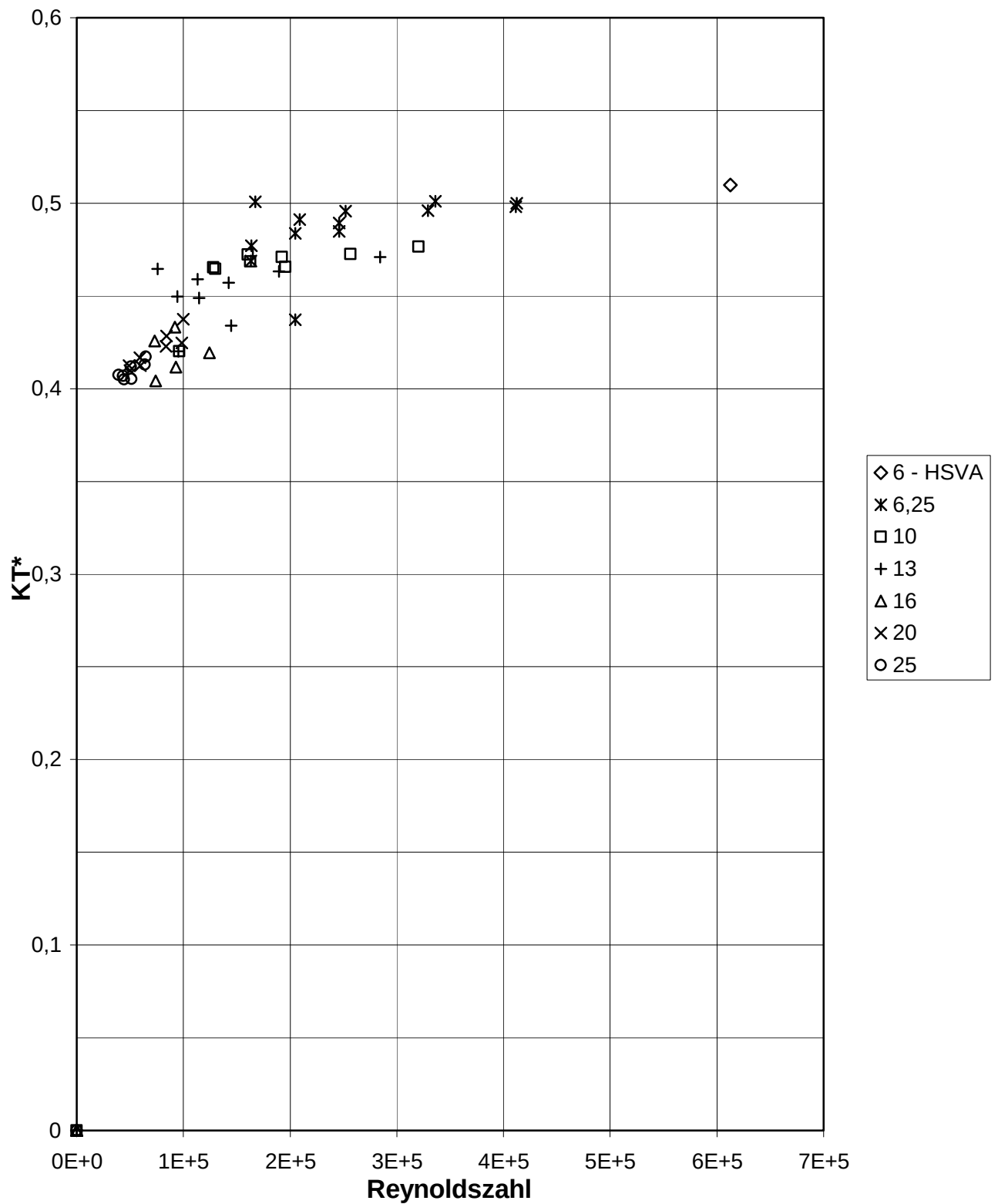


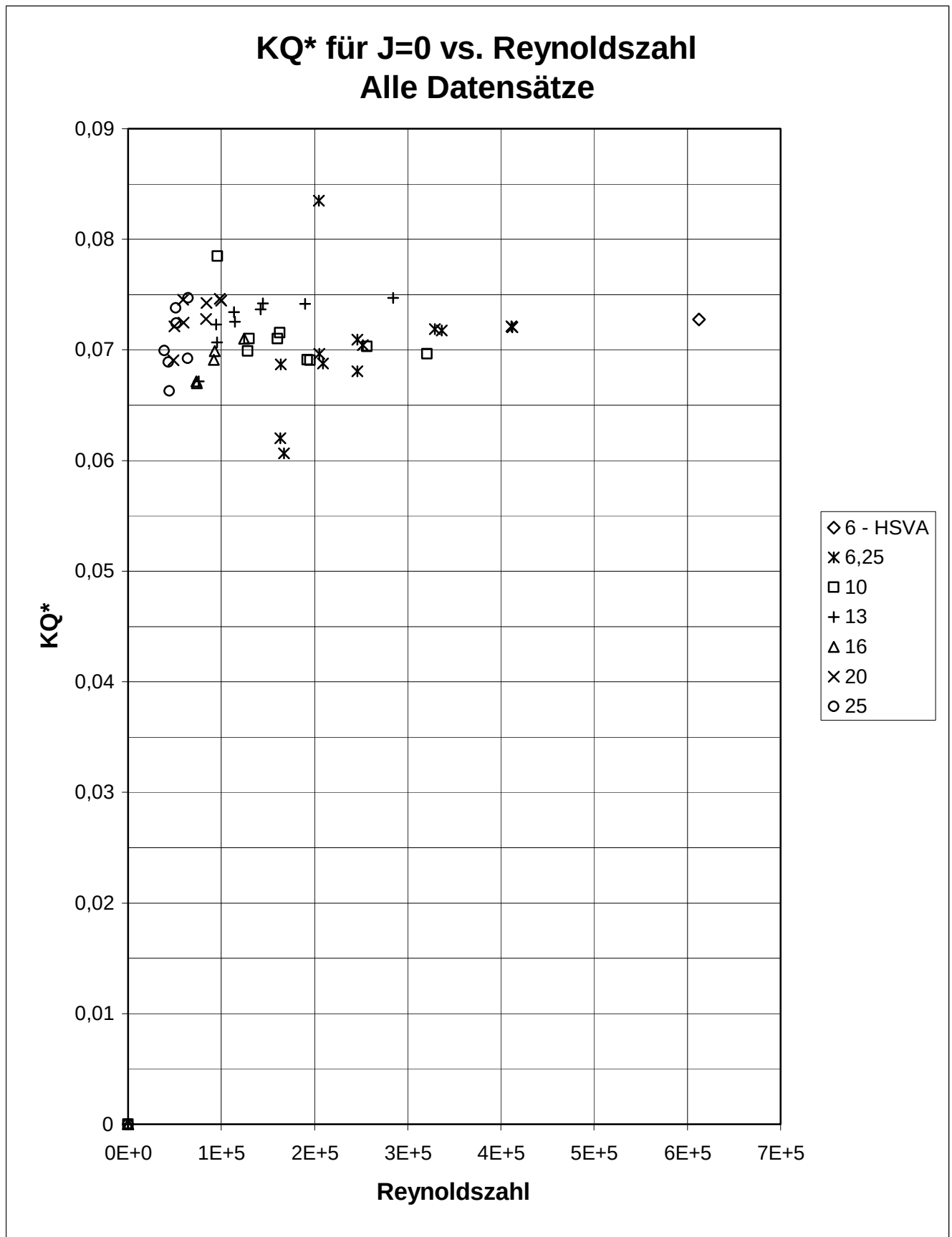




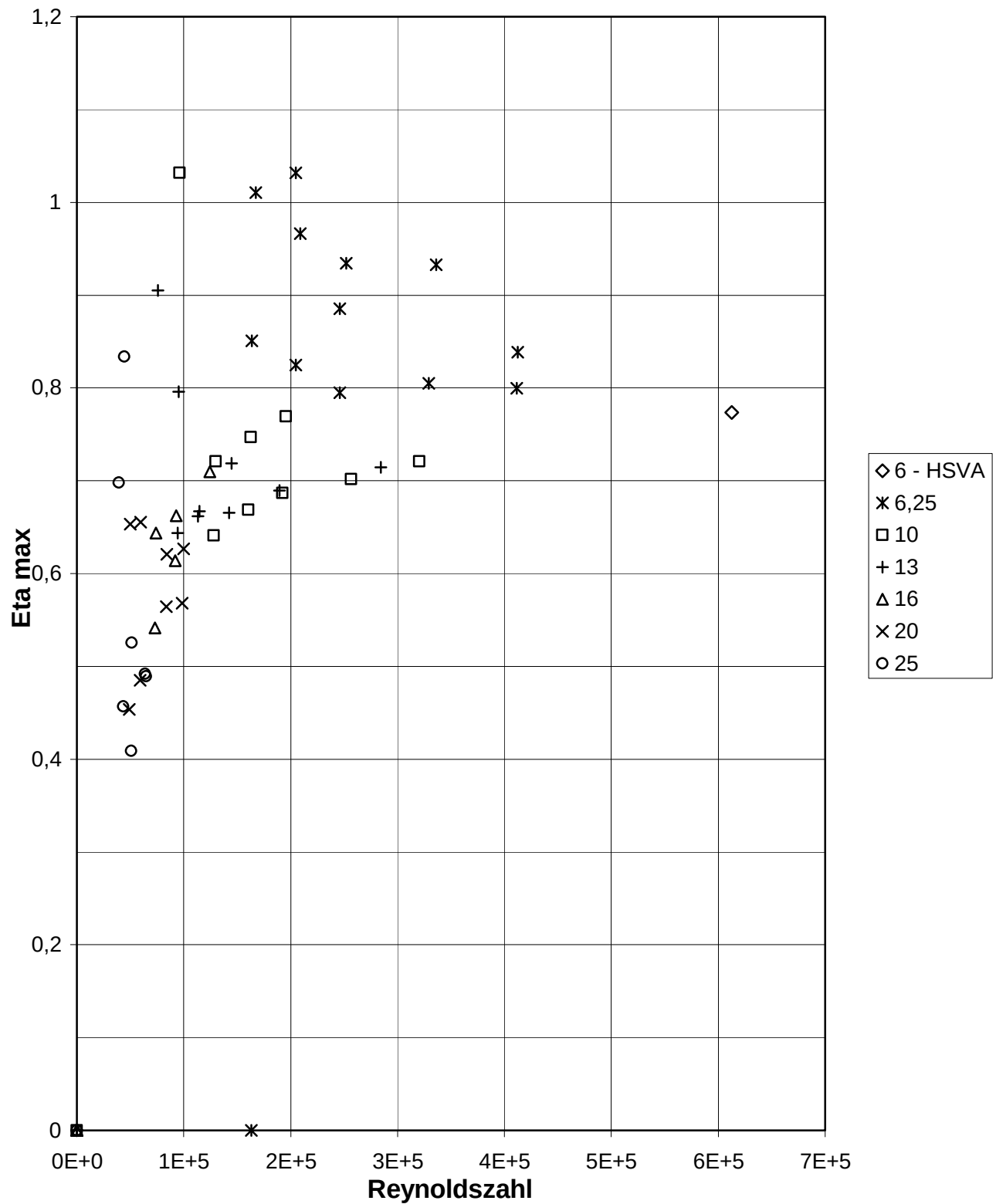


KT* für J=0 vs. Reynoldszahl **Alle Datensätze**

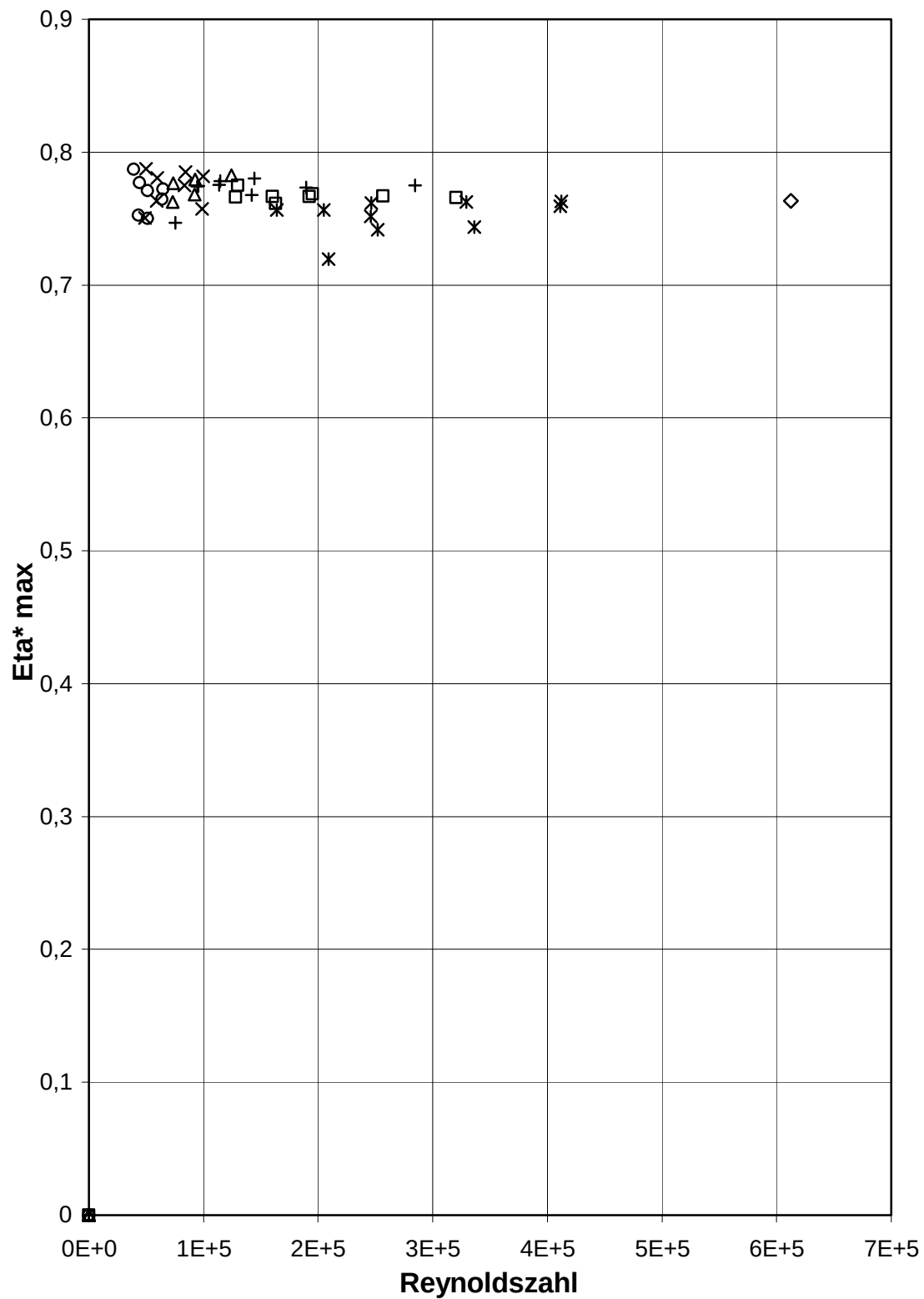




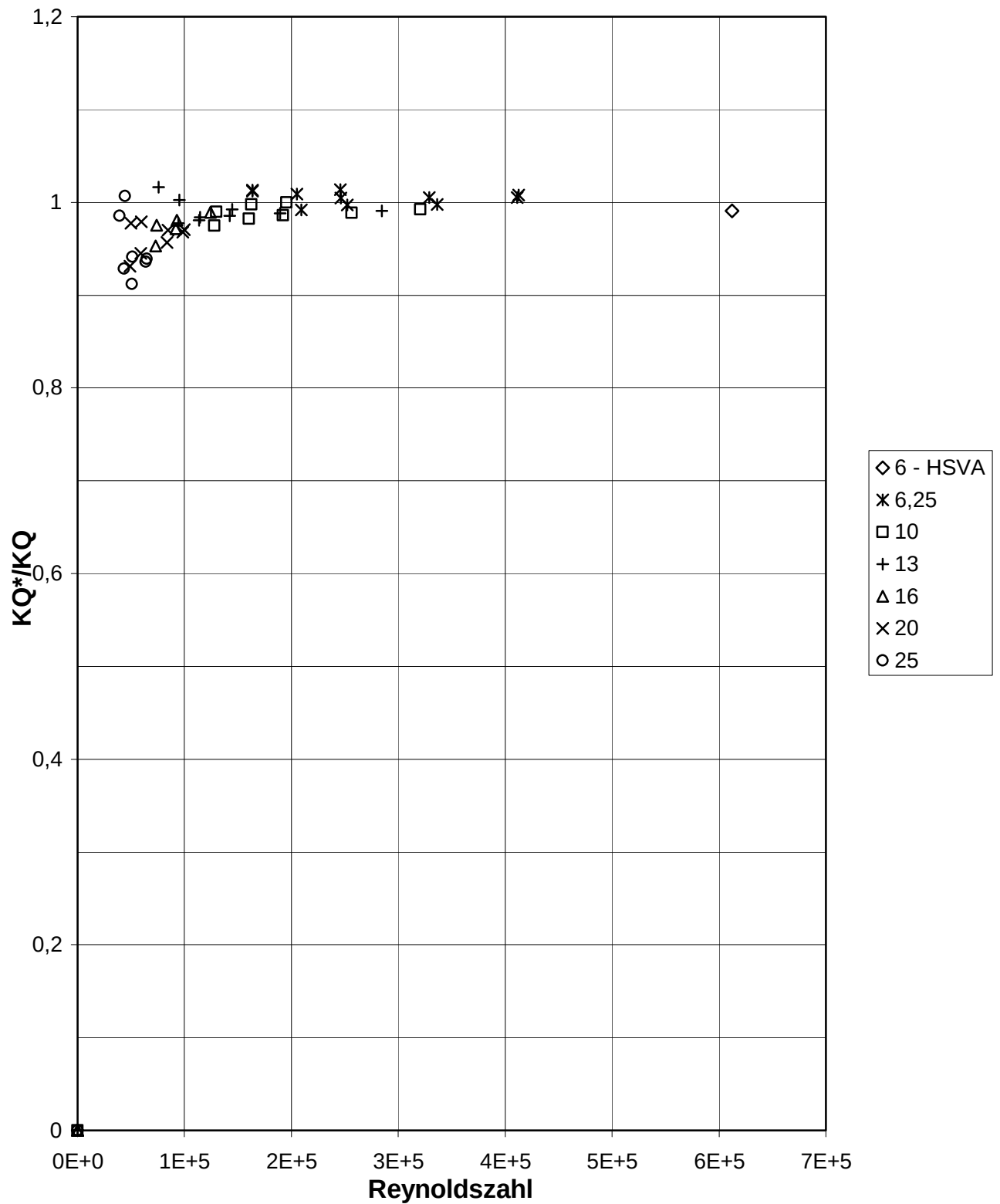
Maximaler Wirkungsgrad Eta max vs. Reynoldszahl - Alle Datensätze



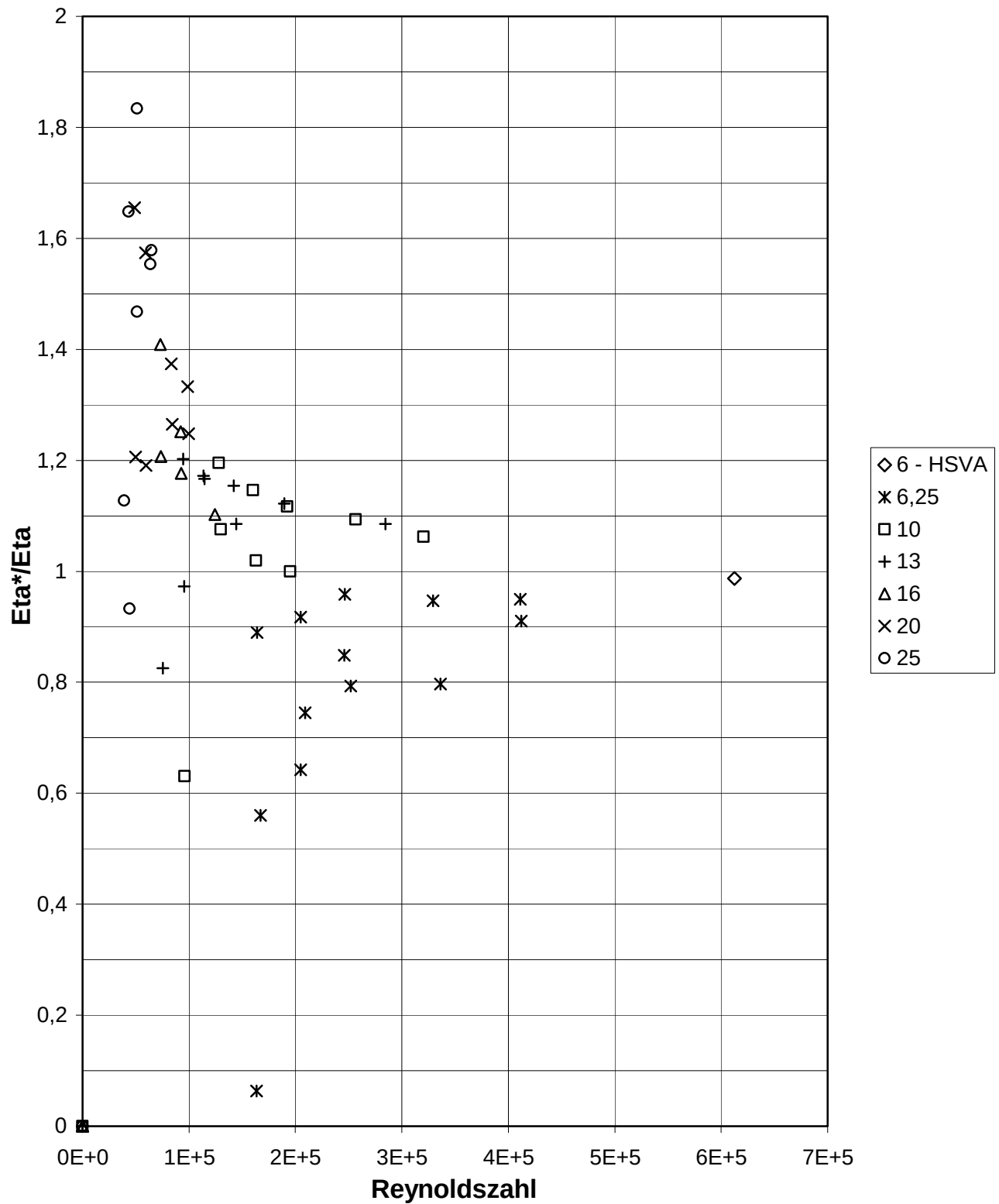
Maximaler Wirkungsgrad $\eta^*_{\max}$ vs. Reynoldszahl - Alle Datensätze

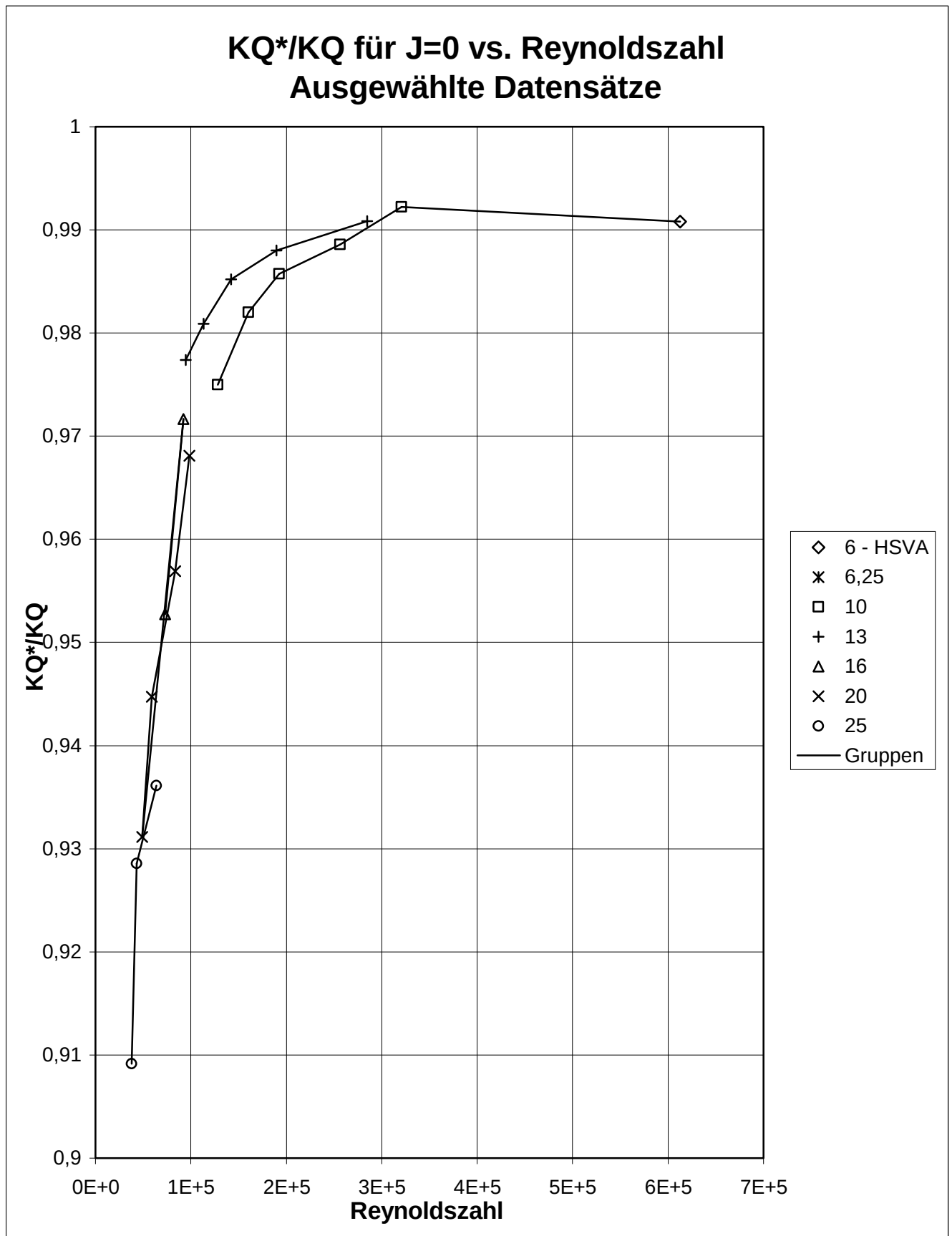


KQ^*/KQ für $J=0$ vs. Reynoldszahl Alle Datensätze

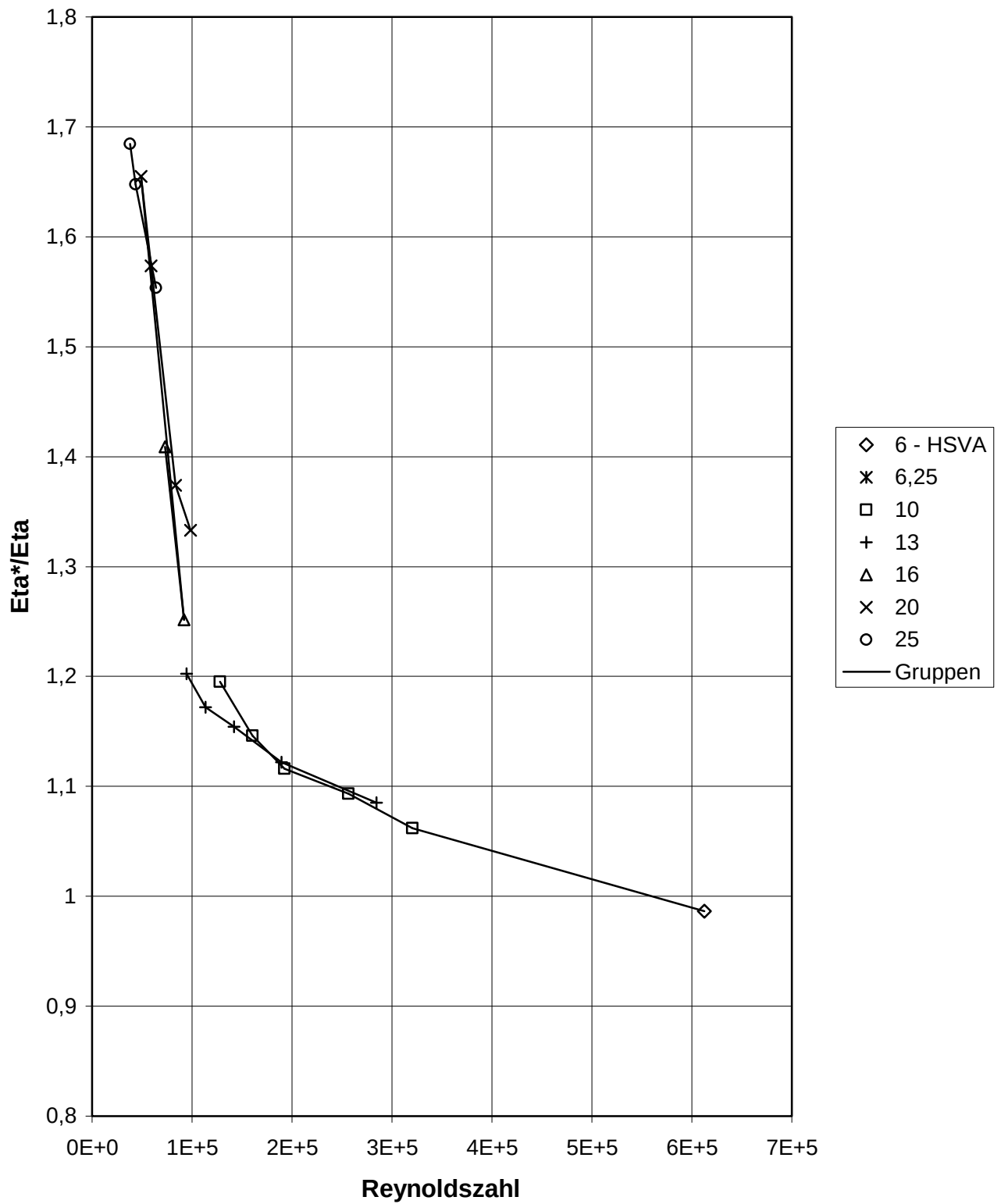


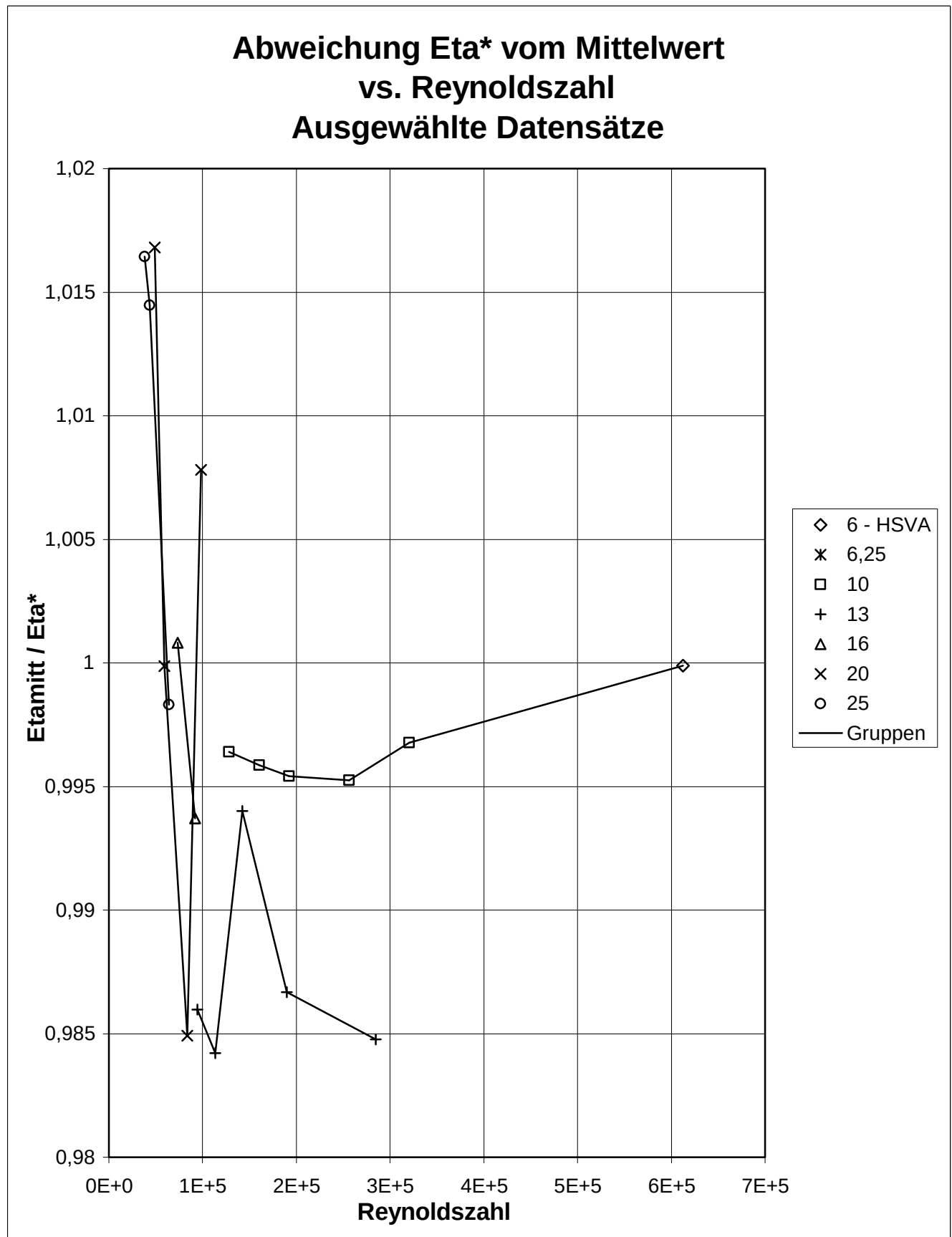
Eta*/Eta max. vs. Reynoldszahl Alle Datensätze



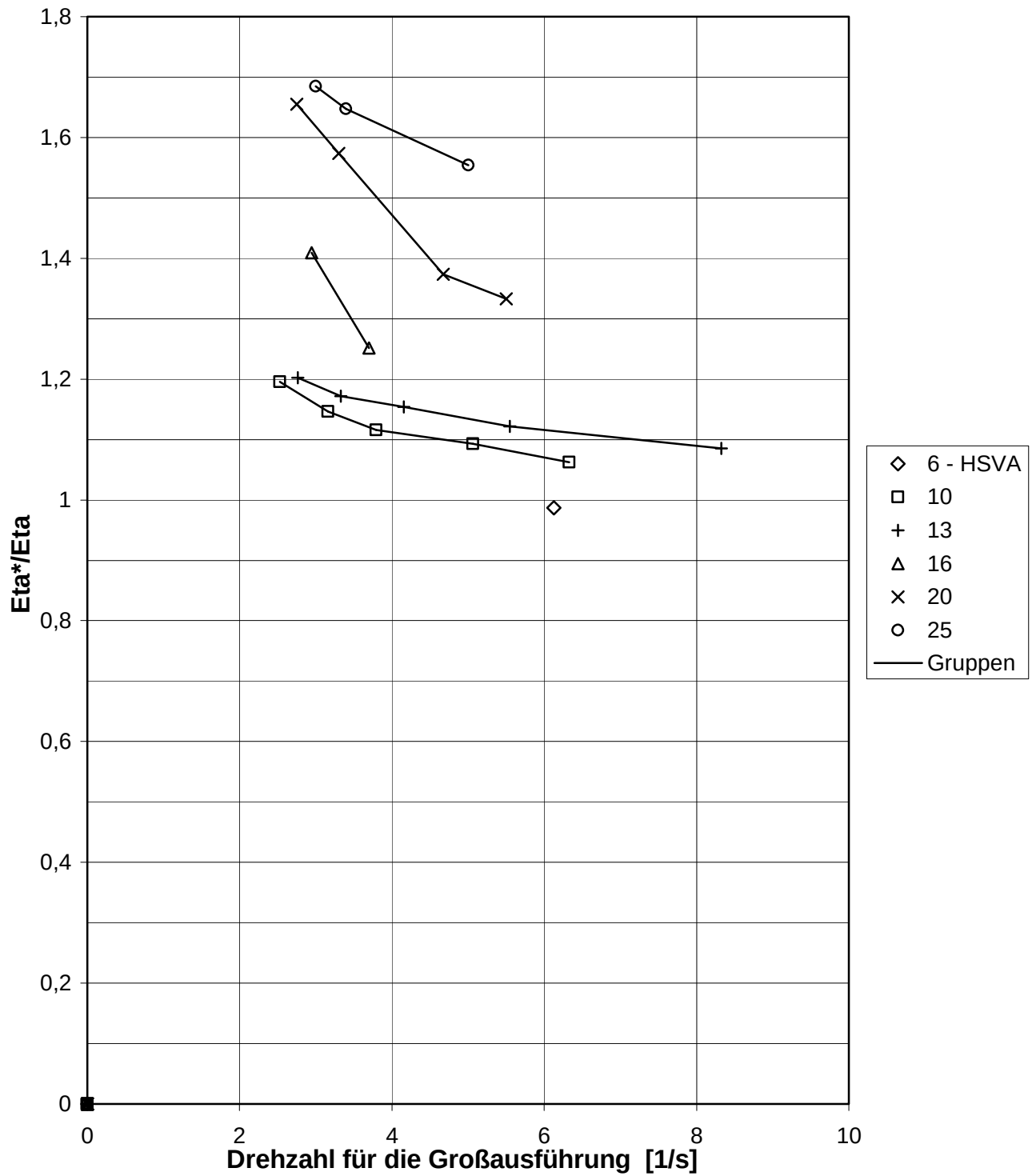


$\eta^*/\eta_{\max}$ vs. Reynoldszahl Ausgewählte Datensätze

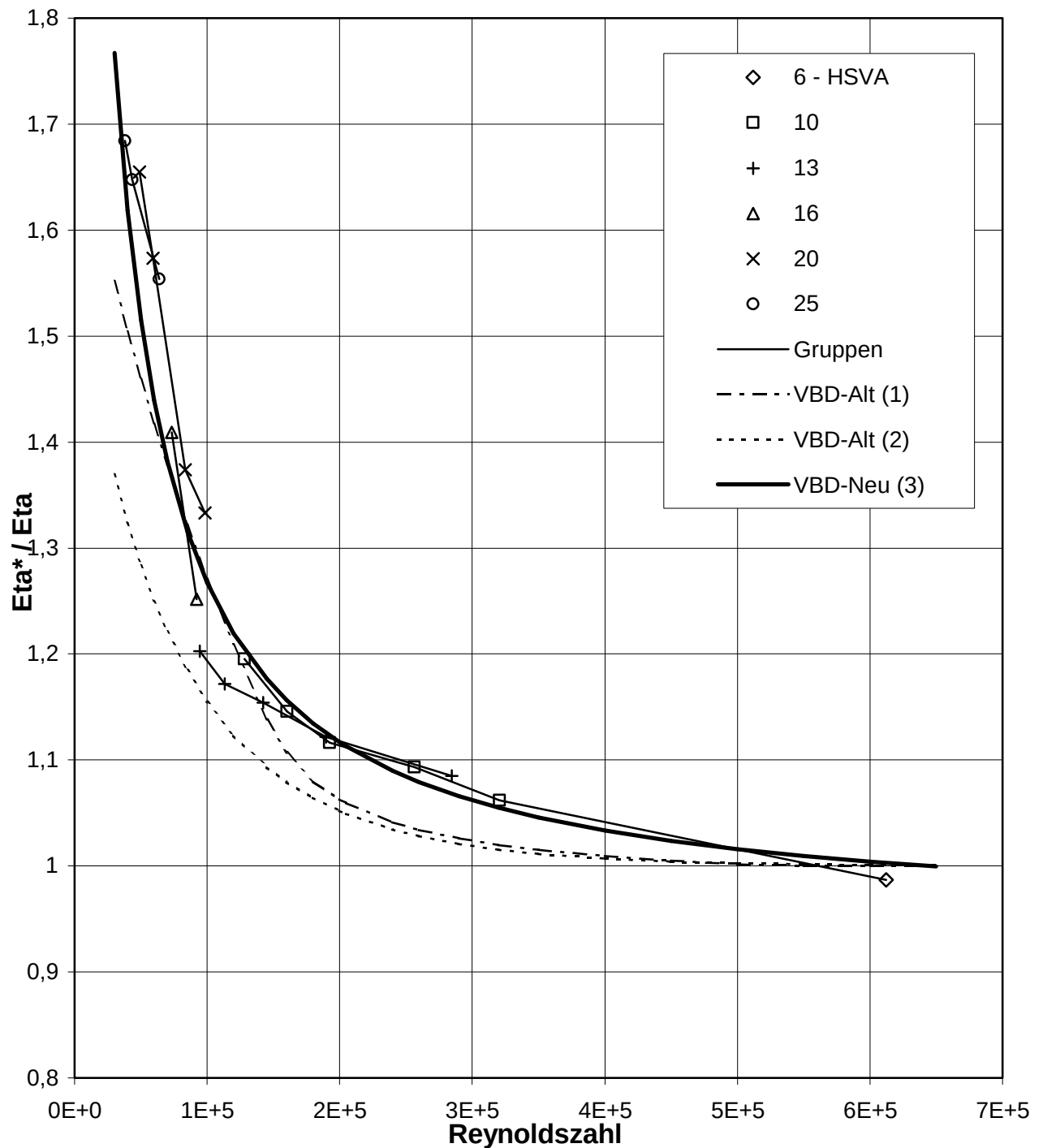




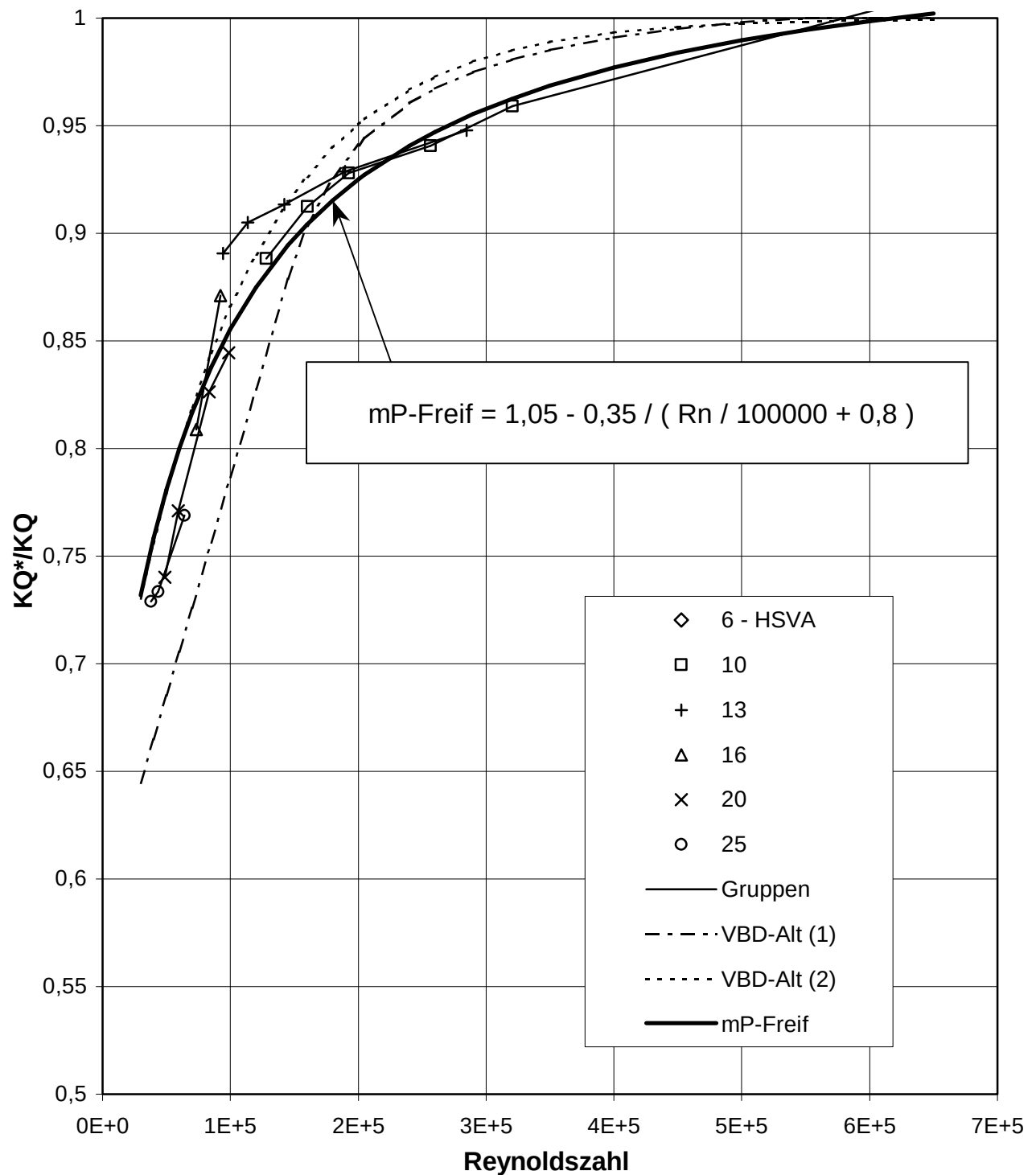
$\eta^*/\eta_{\max}$ vs. Drehzahl für die Großausführung Ausgewählte Datensätze



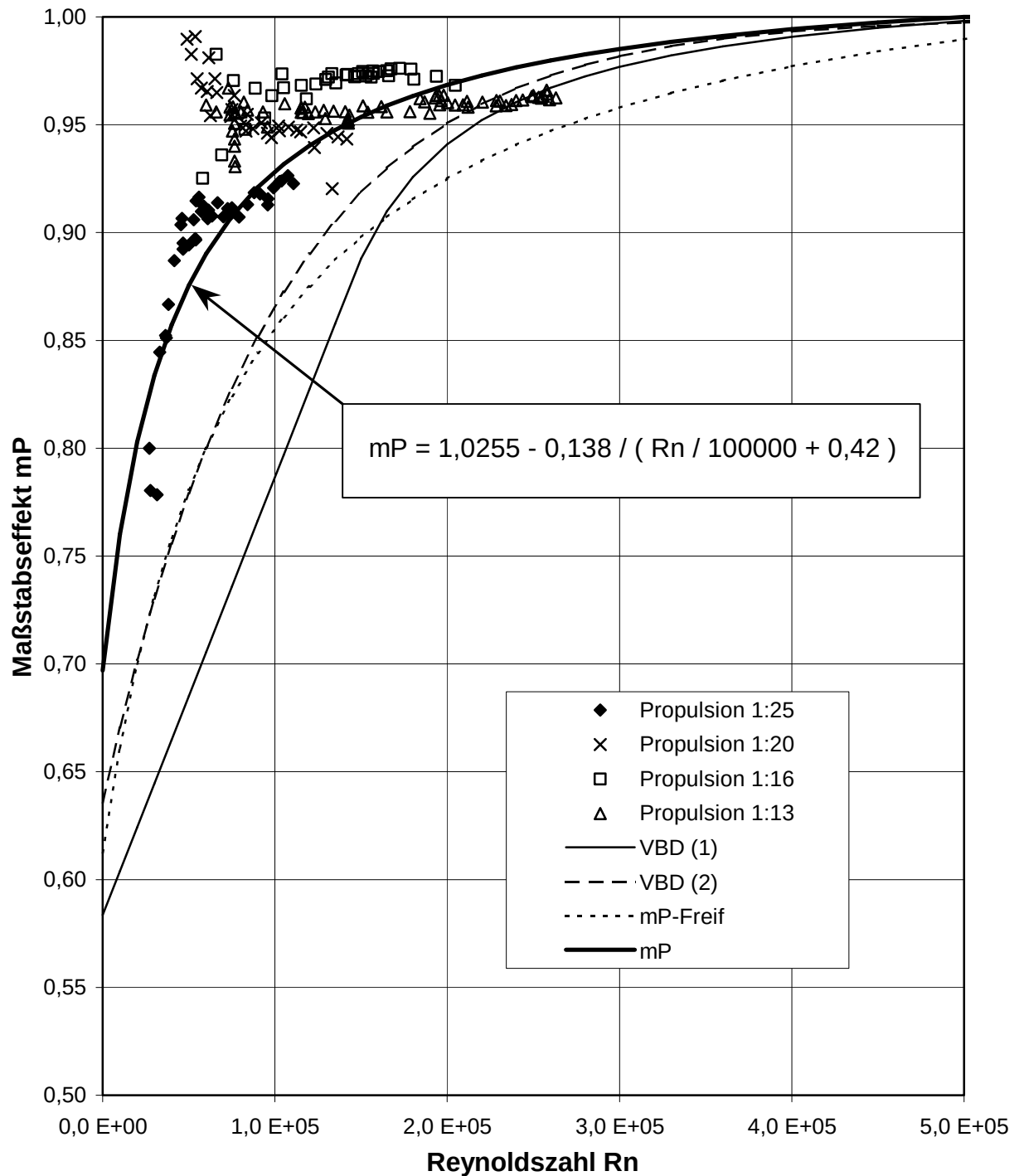
Verhältnis der Wirkungsgrade vs. Reynoldszahl Ausgewählte Datensätze



Verhältnis der Drehmomentbeiwerte im Bereich von Etamax vs. Reynoldszahl Ausgewählte Datensätze



Maßstabseffekt aus Propulsionsversuchen



Maßstabseffekt aus Propulsionsversuchen, Abhängigkeit vom Modellmaßstab

